

جامعة قاصدي مرياح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء



مذكرة

مقدمة لنيل شهادة

ماسـتر أكاديمي

تخصص: فيزياء طاقوية

مقدمة من طرف الطالبتين : بالعيد فريحة و بن عزوز الزهرة

بـعـنـوان:

دراسة مقارنة بين أنظمة تخزين الطاقة الحرارية

نوقشت علنا يوم : 2017/ 05 / 23 تحت إشراف اللجنة :

رئيسا	جامعة قاصدي مرياح - ورقلة	أ. محاضر - أ -	محسن حسين
ممتحنا	جامعة قاصدي مرياح - ورقلة	أ. محاضر - أ -	بوغالي سليمان
مؤطرا	جامعة قاصدي مرياح - ورقلة	أ. محاضر - أ -	بشكي جمال
مساعد مؤطر	جامعة قاصدي مرياح - ورقلة	أ. التعليم العالي	بوقطاية حمزه

2017/2016

إهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه كما ينبغي لجلال

وجهه وعظيم سلطانه وكما يليق بعظيم نعمه علينا .

الحمد لله الذي هدانا إلى طريق العلم والمعرفة .

الحمد لله الذي وقفنا لإنجاز هذه المذكرة وإتمام هذا البحث العلمي المتواضع

والذي أهديه إلى :

أمي الحبيبة التي أحاطني بدعواتها الخالصة وإلى أبي الغالي الذي علمني
حروفي الأولى وكان قدوتنا في العمل والمثابرة أدام الله عليهما نعمة الصحة

والعافية .

إلى أبو بناتي محمد الذي ساندني في إنجاز هذا العمل جزاه الله عنا كل
الخير وأدامه ذخرا وعونا لنا .

إلى بناتي الحبيبات : سارة ، إيمان ، أسماء ، مريم و آسيا . سائلة
المولى عز وجل أن يوفقهن للعلم والعمل .

إلى إخوتي الأعزاء : أحمد ، ليلي ، زينب ، عبد الله ، خديجة ، يونس
، عبد السلام حليلة وهاجر .

إلى كل من ساعدني أو دعى لي بظهور الغيب

بن عزوز زهرة

إهداء

الحمد لله الذي أنار لنا درب العلم والمعرفة وأعاننا

على أداء هذا الواجب ووقفنا إلى انجاز هذا العمل

إلى من لا يمكن للكلمات أن توفي حقها ، إلى من لا يمكن للأرقام أن

تحصي فضائلها

إلى والدي العزيزين أدامهما الله لي

إلى أفراد أسرتي ، سندي في الدنيا كل باسمه

إلى أساتذتي الكرام، الذين لهم الفضل في

وصولنا إلى ما نحن عليه

إلى كل طلبة ماستر فيزياء طاقوية دفعة 2017/2016

إلى كل من سقط من قلبي سهوا

أهدي هذا العمل

وفي الأخير أتوجه بجزيل الشكر والامتنان إلى كل من ساعدني

من قريب أو من بعيد على انجاز هذا العمل وفي تذليل ما واجهته

من صعوبات

بالعيد فريحة

تشكرات

نتقدم بالشكر الجزيل لكل أساتذة دفعة ماستر فيزياء
طاقوية 2016 / 2017 وللأستاذ المؤطر .

كما نتقدم بالشكر الى كل الزملاء في هذه الدفعة وكل من
ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل .

بالعيد فريجة وبن عزوز الزهرة

الفهرس

الفهرس :

- 5..... قائمة الأشكال و الجداول
- 7..... قائمة المقادير الفيزيائية.
- 8..... قائمة الرموز والإختصارات
- 10..... المقدمة

الفصل الأول : عموميات حول التيرموديناميك والانتقال الحراري

- 13..... 1.I النظام الديناميكي الحراري
- 13..... 1.1.I النظام الديناميكي الحراري
- 13..... 2.1.I خصائص اديناميكا الحرارية
- 14..... 3.1.I الحرارة المحسوسة والحرارة الكامنة
- 14..... 4.1.I الحالة وتغير الحالة
- 15..... 5.1.I أنواع تغير الحالة
- 16..... 6.1.I الطاقة الداخلية
- 17..... 7.1.I الأنتالي
- 17..... 8.1.I الانتروبي
- 18..... 9.1.I الحرارة
- 18..... 10.1.I الغاز المثالي
- 19..... 11.1.I العمل
- 20..... 12.1.I القانون الاول للديناميكا الحرارية
- 20..... 13.1.I القانون الثاني للديناميكا الحرارية
- 21..... 14.1.I الإجراءات الانعكاسية وغير الانعكاسية
- 21..... 2.I الإنتقال الحراري
- 22..... 1.2.I إنتقال الحرارة بالتوصيل
- 23..... 2.2.I إنتقال الحرارة بالحمل
- 24..... 3.2.I إنتقال الحرارة بالإشعاع
- 25..... 3.I . الأعداد اللابعدية في الانتقال الحراري.

الفصل الثاني : تحويل وتخزين الطاقة

- 27..... 1.II مقدمة
- 27..... 2.II أشكال الطاقة
- 27..... 1.2.II الطاقة الكيميائية
- 27..... 2.2.II الطاقة الميكانيكية
- 27..... 3.2.II الطاقة الحرارية
- 27..... 4.2.II الطاقة النووية
- 28..... 5.2.II الطاقة الكهربائية

28.....	6.2.II. الطاقة الضوئية
28.....	3.II. الطاقة الأولية والطاقة الثانوية
29.....	4.II. مصادر الطاقة
29.....	1.4.II. مصادر الطاقة غير المحددة
30.....	2.4.II. مصادر الطاقة المتجددة
35.....	5.II. تحويل الطاقة
38.....	6.II. تخزين الطاقة
38.....	1.6.II. تخزين الطاقة الميكانيكية
40.....	2.6.II. تخزين الطاقة الكيميائية
41.....	3.6.II. تخزين الطاقة الحرارية
42.....	4.6.II. تخزين الطاقة الكهربائية

الفصل الثالث : تخزين الطاقة الحرارية

44.....	1.III. مقدمة
44.....	2.III. تخزين الطاقة الحرارية
46.....	3.III. فوائد التخزين الطاقة الحرارية
47.....	4.III. أنظمة التخزين الحراري
47.....	1.4.III. تخزين الطاقة بالحرارة المحسوسة
48.....	1.1.4.III. تخزين الحرارة المحسوسة مع المواد السائلة
49.....	2.1.4.III. تخزين الحرارة المحسوسة مع المواد الصلبة
50.....	3.1.4.III. حلول تكنولوجيا التخزين بالحرارة المحسوسة
50.....	2.4.III. تخزين الطاقة بالحرارة الكامنة
50.....	1.2.4.III. مفهوم التخزين بالحرارة الكامنة
52.....	2.2.4.III. المواد متغيرة الطور MCP
53.....	3.2.4.III. إيجابيات و سلبيات أشكال متغيرة الطور
54.....	4.2.4.III. بعض الظواهر التي تؤثر في كفاءة التخزين
56.....	5.2.4.III. إختيار ال MCP
56.....	6.2.4.III. أكثر المواد متغيرة الطور إستخداما
57.....	7.2.4.III. تقنيات لتكييف مواد متغيرة الطور MCP
57.....	1.7.2.4.III. التغليف الكلي
58.....	2.7.2.4.III. تغليف صغير
58.....	3.7.2.4.III. دمج بنيات معدنية مع MCP
59.....	4.7.2.4.III. توزيع المواد ذات توصيلية عالية في MCP
95.....	8.2.4.III. تطبيقات ال MCP
59.....	1.8.2.4.III. تطبيقات مواد ال MCP في الصناعة
59.....	2.8.2.4.III. تطبيقات مواد ال MCP في التبريد الحرارو الكيميائي

56.....	3.8.2.4.III تطبيقات ال MCP في محركات ذات الإحتراق الداخلي
60.....	4.8.2.4.III تطبيقات ال MCP في بطارية الليثيوم
61.....	5.8.2.4.III تطبيقات ال MCP في التبريد الإلكتروني
61.....	6.8.2.4.III تطبيقات ال MCP في المباني
61.....	7.8.2.4.III تطبيقات ال MCP في التخزين الشمسي الحراري
62.....	3.4.III التخزين الحرارو كيميائي
65.....	1.3.4.III بعض التفاعلات الكيميائية الإنعكاسية

الفصل الرابع : مقارنة بين أنظمة التخزين الحراري

70.....	1.IV مقدمة
70.....	2.IV معايير إختيار وتصميم نظم التخزين
71.....	3.IV مقارنة بين أنظمة التخزين الحراري
71.....	1.3.IV من حيث كثافة الطاقة ودرجة الحرارة وزمن التخزين
72.....	1.1.3.IV كثافة الطاقة في التخزين المحسوس
72.....	2.1.3.IV كثافة الطاقة في التخزين الكامن
74.....	3.1.3.IV كثافة الطاقة في التخزين الحراروكيميائي
74.....	2.3.IV حيث خصائص مواد التخزين المستعملة
74.....	1.2.3.IV مواد التخزين الحساس السائلة
75.....	2.2.3.IV مواد التخزين الحساس الصلبة
77.....	3.2.3.IV مواد التخزين الكامن MCP
81.....	4.2.3.IV مواد التخزين الحراروكيميائي
85.....	3.3.IV الجانب الاقتصادي والنضج التكنولوجي
85.....	1.3.3.IV تكنولوجيات التخزين الحساس
88.....	3.3.2.IV تكنولوجيات التخزين الكامن
90.....	3.3.3.IV تكنولوجيات التخزين الحراروكيميائي
93.....	4.IV ملخص للميزات الايجابية لكل نظام والتطبيقات الأكثر مناسبة لإستخدامها
95.....	الخاتمة
98.....	المراجع

قائمة الأشكال

- 15.....دورة رانكين.....
- 16.....دورة كارنو.....
- 19.....العمل الازاخي لمكبس.....
- 23.....التوصيل الحراري خلال جدار مكون من طبقة واحدة.....
- 24.....انتقال الحرارة بالحمل على سطح مستوي.....
- 29.....الطاقة الأولية والطاقة الثانوية.....
- 31.....محطة طاقة كهرومائية.....
- 32.....لاقط الطاقة الشمسية (capteurs solaires).....
- 33.....أحواض ذو قطع مكافئ (paraboliques) لتجميع الطاقة الشمسية.....
- 33.....خلايا ضوئية.....
- 34.....الكتلة الحيوية.....
- 34.....طاحونات هوائية.....
- 35.....الحرارة الجوفية.....
- 36.....تحول وضياع الطاقة.....
- 39.....نظام الضخ المائي.....
- 39.....نظام الهواء المضغوط.....
- 40.....دولاب الموازنة.....
- 40.....بطارية الرصاص الحمضية.....
- 41.....مبدأ عمل مضخة حراروكيميائية.....
- 42.....نموذج لوحه مسطحة لمكتفة.....
- 44.....عدد الأبحاث المنشورة سنويا عن تخزين الطاقة الحرارية.....
- 45.....مخطط تصنيف أنظمة تخزين الطاقة الحرارية.....
- 47.....مخطط يوضح تقنيات تخزين الطاقة الحرارية.....
- 51.....منحنى يوضح الخطوات المختلفة خلال تخزين الحرارة الكامنة (الصلبة / السائلة).....
- 52.....الإختلاف في المحتوى الحراري محدد على أساس درجة حرارة (لمادة نقيه و خليط).....
- 53.....مخطط يوضح تصنيف مواد متغيرة الطور MCP.....
- 55.....منحنى يوضح ظاهرة فرط البرودة.....
- 57.....أشكال مختلفة من التغليف الكلي.....
- 57.....تكييف ال MCP في عقيدات.....
- 58.....مختلف أنواع التغليف الصغير.....
- 58.....وصف للتغليف الصغير.....
- 59.....تمثيل مختلف انواع ادماج ال MCP عن طريق بنيات معدنية.....
- 60.....البطارية الحرارية.....
- 60.....سكوتر كهربائي.....
- 62.....أنبوب TSA الشمسية باستخدام MCP.....

63.....	مخطط يوضح مبدأ التخزين الحراري كيميائي.
64.....	التطور الزمني لنشر المقالات وبراءات الاختراع على التخزين الحراري كيميائي.
64.....	تصنيف التفاعلات الكيميائية كثيرة الاستعمال في التخزين الحراري كيميائي.
71.....	معايير اختيار نظام التخزين الحراري.
72.....	منحنى درجة الحرارة - الأنتالي لنظام تخزين حرارة كامنة.
76.....	الحجم اللازم لنفس كمية الطاقة المحسوسة المخزنة لمواد تخزين مختلفة.
82.....	بيانات توازن التفاعل العكسي لهيدريد المغنيزيوم.
83.....	بيانات توازن التفاعل العكسي لكاربونات الكالسيوم.
84.....	بيانات توازن التفاعل العكسي للهيدروكسيدات.
86.....	مختلف تقنيات التخزين بالحرارة بالحرارة المحسوسة تحت الأرض.
87.....	محطة شمسية حرارية لتخزين موسمي (Hambourg).
89.....	صورة لمبنى بالأبعاد (2.4mx2.4mx2.4m) (béton+MCP).
89.....	مبنى يعازل من البوليوريثان (polyuréthane) و MCP.
90.....	مضخة حراري كيميائية CaO/CO ₂ /PbO.
91.....	نموذج MODESTORE للتخزين الحراري الموسمي.

قائمة الجداول

25.....	يقدم أهم المعاملات اللابعدية في الانتقال الحرارة.	الجدول I.1.
30.....	يقدم خصائص نموذجية لفحوم مختلفة.	الجدول II.1.
37.....	يقدم بعض عمليات وأجهزة تحويل الطاقة.	الجدول II.2.
50.....	يوضح الحلول التكنولوجية لتخزين بالحرارة الحساسة.	الجدول III.1.
54.....	يقدم إيجابيات وسلبيات مختلف متغيرات الحالة في التخزين الكامنة.	الجدول III.2.
71.....	يقدم بعض الخصائص الحرارية لأنظمة التخزين الحراري.	الجدول IV.1.
73.....	يقدم خصائص MCP (خلايا هيدرات الصوديوم).	الجدول IV.2.
74.....	يقدم خصائص بعض مواد التخزين الحساس السائلة.	الجدول IV.3.
75.....	يقدم بعض مواد التخزين الحساس الصلب.	الجدول IV.4.
77.....	يقدم اعتبارات اختيار مادة MCP للتخزين الحراري الكامن.	الجدول IV.5.
78.....	يقدم بعض خواص مواد تغيير الطور (صلب-سائل) العضوية وغير العضوية.	الجدول IV.6.
79.....	يقدم خصائص حرارية لبعض أهم مواد MCP غير العضوية.	الجدول IV.7.
80.....	يقدم خصائص بعض أهم مواد التخزين العضوية.	الجدول IV.8.
81.....	يقدم الخصائص الحرارية لأكثر التفاعلات استعمالا في التخزين الحراري كيميائي.	الجدول IV.9.
93.....	يلخص مقارنة بين إيجابيات أنظمة التخزين الحراري وتطبيقاتها المناسبة.	الجدول IV.10.

قائمة المقادير الفيزيائية

المقادير	تعريف المقدار	الوحدة
T	درجة الحرارة	C°
M	الكتلة	Kg
P	الضغط	Pa
N	الجسيمات كثافة	m ³ /جسيمات/
□	الكتلة الحجمية	kg/m ³
u	الطاقة الداخلية	J
S	الانترودية	J
γ	اللزوجة التحركية	kg/m.s
μ	اللزوجة الحركية	m ² /s
U	السرعة	m/s
V	الحجم	M ³
B	معامل التمدد الحجمي	k ⁻¹
Q	كمية الحرارة المخزنة	J
L	الحرارة الكامنة لمرحلة تغير الطور	J.kg
C	السعة الحرارية	J/kg.K
W	العمل	J
H	الأنتالبية	J.kg ⁻¹
R	ثابت الغاز النوعي	kJ/kg.K
M	الكتلة الجزئية	Kg
\bar{R}	ثابت الغاز بدلالة الوزن الجزيئي	kJ/mol.K
ν	الحجم النوعي	kg/m ³
Y	المسافة	M
G	ثابت الجاذبية الأرضية	m/s ²
F	القوة	N
A	مساحة السطح	m ²
K	ثابت الموصلية الحرارية	W/m. K
H	معامل انتقال الحرارة بالحمل	W/m ² C°
Σ	معامل انتقال الحرارة بالإشعاع	W/m ² . K ⁴

قائمة الرموز والإختصارات

الرموز الدلالية

عكوس	Rev
ميكانيكي	Mech
صلب	S
غاز	g
مائع	f
درجة حرارة الحالة الابتدائية	T1
درجة حرارة الحالة النهائية	T2
تحت ضغط ثابت	P
الداخلة	In
الخارجة	Out

قائمة الاختصارات

مواد تغير الطور	MCP
درجة حرارة منخفضة	TC
درجة حرارة مرتفعة	TH
عدد غارشوف اللابعدى	Gr
عدد نيوسالت اللابعدى	Nu
عدد براندل اللابعدى	Pr
عدد رينولدز اللابعدى	Re
تخزين الطاقة الحرارية	TES
كيلواط ساعي	kWh

الرموز

التغير في الكمية	Δ
التفاضل التام	d
التكامل	\int
التغير (تفاضل غير تام)	\square

المقدمة

مقدمة :

تعتبر الطاقة من أهم المقومات الرئيسية للمجتمعات المتحضرة. وتحتاج إليها كافة قطاعات المجتمع بالإضافة إلى الحاجة الماسة إليها في تسيير الحياة اليومية ، فالطلب العالمي على الطاقة هو في مستوى 12.5Gtep وهو في تزايد مستمر وقد يصل بين 20 و 25 Gtep في آفاق 2050 [9] لكن العالم اليوم يمر بمرحلة تحول في مجال الطاقة . لأن الموارد الطاقوية تنخفض و يتزايد التلوث و يتغير المناخ. فالوقود الأحفوري على وشك النفاذ في العقود القليلة القادمة، اذا اصبح من الضروري إيجاد حلول و بدائل من شأنها أن تضمن وفرة مستمرة للطاقة التي نحتاجها من جهة وكذلك إستغلال الطاقة الضائعة من جهة أخرى .

ومن بين هذه الحلول إعتداد أنظمة لتخزين الطاقة في شتى أشكالها ، فالتخزين يهتم بالدرجة الأولى بالموارد الطاقوية أو بسهولة الوصول إليها فهو يوازن الإنتاج مع الإستهلاك كما أنه يجدد من ضياع الطاقة و يعتبر مهم حتى في حالة الطاقات المتجددة فالحاجة للتخزين هي إستجابة لإعتبارات إقتصادية وبيئية وجيوسياسية وتكنولوجية .ومن أنواع التخزين نجد التخزين الحراري فهو واحد من التكنولوجيات الرئيسية للحفاظ على الطاقة وانطلاقا من هذه الأهمية جاء اختيارنا لموضوع بحثنا هذا وهو التعرف على التخزين الحراري وأنظمتها المحسوسة والكامنة والحراروكيميائية كما نركز على التخزين الحراري بالنسبة ليوم أو عدة أشهر والذي يعتبر حلا مهما فيما يخص تامين الطاقة الشمسية الحرارية والصناعية .فماهو النظام الأنسب والأحسن للتخزين الحراري لكل تطبيق مقترح؟ إن الهدف المرجو من الدراسة هو إختيار نظام التخزين الحراري المناسب على حسب حاجة وظروف التخزين المعطى . وهذا بإعتداد طريقة المقارنة بين أنظمة التخزين الحراري (المحسوسة والكامنة والحراروكيميائية) بإعتبار مجموعة من المعايير المقترحة .

خلال هذا البحث سنتطرق الى أربع فصول لدراسة مقارنة بين أنظمة التخزين الحراري الحساسة والكامنة والحراروكيميائية بداية بالفصل الأول الذي يعطي ملخص لعموميات التيرموديناميك والإنتقال الحراري مقدما الجوانب التمهيديّة للديناميكا الحرارية من تعاريف أساسية للحرارة المحسوسة والكامنة والحالة وتغيراتها والانتالي لأهميتهم في أنظمة التخزين الحراري كما أشرنا للقانون الأول والثاني لديناميكا الحرارية ومن ثم طرق الإنتقال الحراري الثلاث وهي :

إنتقال الحرارة بالتوصيل وبالإشعاع وبالحمل ، أما الفصل الثاني يتركز على جزئين أولهما التعرف على الطاقة وأشكالها ومصادرها وأنواعها مع توضيح تحولات الطاقة أما الجزء الثاني فخصص لتخزين الطاقة بأنواعها : الطاقة الكهربائية والميكانيكية والطاقة الحرارية والطاقة الكيميائية . الفصل الثالث يركز على تخزين الطاقة الحرارية والتفصيل في أنظمتها المحسوسة والكامنة والحراروكيميائية حيث تقدم المواد المستعملة في كل نظام وأهم تقنياته المطبقة وأخيرا الفصل الرابع نتطرق فيه لمقارنة بين أنظمة التخزين الحراري المحسوسة والكامنة والحراروكيميائية بإعتماد معايير محددة هي كثافة التخزين الحراري ، مدة التخزين ، خصائص مواد التخزين (الفيزيائية ، الكيميائية ، والحرارية ...) ، الجانب التكنولوجي والاقتصادي ، مسافة نقل الطاقة . ومن خلال مناقشة وتحليل النتائج المحصل عليها يتم إختيار النظام الأنسب .

الفصل الأول

عموميات حول الترموديناميك

والإنتقال الحراري

1. I. عموميات حول الديناميكا الحرارية

1.1. I. النظام الديناميكي الحراري

هو جسم أو مجموعة من الأجسام المادية التي تتبادل الطاقة والمادة فيما بينها ، أو مع الوسط المحيط بها (الأجسام الواقعة خارج حدود النظام الدينامي الحراري ، والمسماة بالوسط المحيط أو الوسط الخارجي).

وتصنف الأنظمة الديناميكية الحرارية حسب شروط التبادل للطاقة والمادة مع الوسط الخارجي إلى ما يلي:

✓ الجملة الدينامية الحرارية المعزولة : وهي النظام الذي لا يتم تبادل لا للطاقة ولا للمادة مع الوسط المحيط.

✓ الجملة الدينامية الحرارية المغلقة : وهي النظام الذي لا يحدث تبادل للمادة بينه وبين الوسط المحيط ولكن يحدث بينهما تبادل للطاقة.

✓ الجملة الدينامية الحرارية المفتوحة: وهي النظام الذي يحدث بينه وبين الوسط المحيط تبادل للمادة.

✓ نظام ثابت الحرارة (Adiabatique): لا يوجد تبادل للحرارة مع الوسط المحيط.

✓ نظام متساوي حراريا (Isotherme): له درجة حرارة موحدة (متجانس) داخل حدود النظام.

✓ نظام متساوي الضغط (Isobare) : له ضغط موحد داخل حدود النظام.

✓ نظام متساوي الحجم (isochore): له حجم ثابت داخل حدود النظام.

✓ نظام مستقر (stable): خصائصه مستقلة عن الزمن. [1]

2.1. I. خصائص الديناميكا الحرارية

توضح لنا الديناميكا الحرارية اعتماد الحرارة والشغل الميكانيكي عند حدود النظام على دوال الحالة التي تصف حالة النظام. ومن

هذه الدوال نجد : درجة الحرارة T ، والضغط p ، وهذه تسمى "خواص مكثفة" ، وصفات أخرى مثل الطاقة الداخلية U

وإنتروبيا S ، والحجم V وعدد الجسيمات N ، وقد جرى العرف على تسميتها كميات شمولية. الفرق بين الكميات المكثفة

والكميات الشمولية ينحصر في كون الدوال المكثفة لا تتغير بتضخيم النظام (إضافة جزء جديد) مثل الكثافة والحرارة النوعية ، أما

الدوال الشمولية أو الكميات الشمولية فهي تزداد بتضخيم النظام مثل عدد الجسيمات ، والطاقة الداخلية (المحتوي الحراري في

النظام) [1].

I. 3.1. الحرارة المحسوسة والحرارة الكامنة

✓ **الحرارة المحسوسة** : هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة 1kg من المادة 1°C دون حدوث تغير في حالة المادة.
ولحساب كمية الحرارة الكامنة تُستعمل المعادلة (1.I) [1].

$$(1.I) \quad Q = mc\Delta T$$

✓ **الحرارة الكامنة** : هي كمية من الحرارة اللازمة لتحويل المادة من حالة إلى أخرى لكل 1Kg من المادة، وتعتبر من الخصائص المميزة للمادة، وحدة قياسها هي الجول. ، المميز لذلك التحول من حالة إلى حالة أنه يحدث دائما عند درجة حرارة ثابتة. ولحساب كمية الحرارة الكامنة تُستعمل المعادلة (2.I) [1].

$$(2.I) \quad Q = mL$$

حيث:

Q : كمية الطاقة الممتصة أو الصادرة من المادة أثناء تحولها من حالة إلى حالة (J)

m : كتلة المادة (kg)

L : الحرارة الكامنة للمادة تختلف من مادة لمادة (J/kg)

ΔT : الفرق في درجة الحرارة (°C)

C : السعة الحرارية (J/ kg. K).

I. 4.1. الحالة وتغيير الحالة

حالة ترموديناميكية (état thermodynamique) : هي عدة خواص لنظام ترموديناميكي يجب تعيينها في صيغة قيم محددة تصف النظام بدقة . وتسمى أي من تلك الكميات "متغير للحالة " أو "إحداثية للحالة " أو "متغير ترموديناميكي ".
مثال على ذلك تغير درجة حرارة النظام أو تغيير حجمه أو تغيير ضغطه : كل تلك الإحداثيات هي متغيرات لحالة النظام ،
ومعرفتها بالضبط يتيح لنا معرفة "حالة النظام " بدقة . وبتعيين عدد معين من المتغيرات الترموديناميكية لنظام تساعدنا على تعيين جميع خواصه الأخرى . وعدد للخواص أو المتغيرات الواجب تعيينها للنظام لوصف حالته بدقة يعتمد على نوع النظام [1].

I.1.5. أنواع تغير الحالة

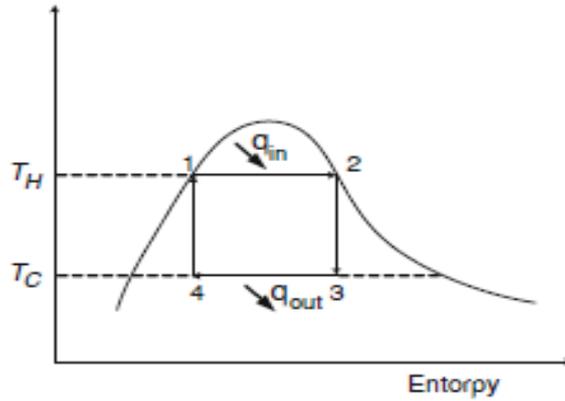
✓ **تحول عكوس** : تحول يتم ببطء شديد ، يمكن للنظام الحراري في أي نقطة منه العودة في الاتجاه المعاكس معيداً وبدقة تامة جميع الشروط التي قد مرت به في التحول الأصلي المباشر .

✓ **تحول لاعكوس** : تحول سريع غير قابل للعكس. وتتصف جميع التحولات الطبيعية بأنها لاعكوسية.

✓ **الدورة المغلقة** : تحول يعود فيه النظام إلى نقطة البدء بعد أن يكون قد مر بعدة مراحل مختلفة. [1]، ويمكن إعطاء أمثلة عن بعض دورات إنتاج المحركات، وهي أنظمة تستخدم لإنتاج الطاقة الصافية. فمعظم المحركات وظيفتها إنتاج طاقة مع عملية دورية باستخدام مائع العمل. محطات توليد الطاقة البخارية تستخدم المياه كمائع للعمل. دورات المحركات الحقيقية معقدة التحليل. ولذلك، فإنه من الشائع لتحليل دورات افتراض أنها تعمل دون احتكاك، وفقدان الحرارة والتعقيدات الأخرى. فتحليل المحرك المثالي ينتج معايير التشغيل الأساسية التي تحكم أداء الدورة [4].

✓ **دورة كارنو** : المحرك الحراري كارنو ينفذ تحويل الحرارة إلى طاقة ميكانيكية من خلال تخفيض درجة حرارة مائع العمل من درجة حرارة T_H عليا إلى درجة حرارة دنيا T_C (الشكل I.1).

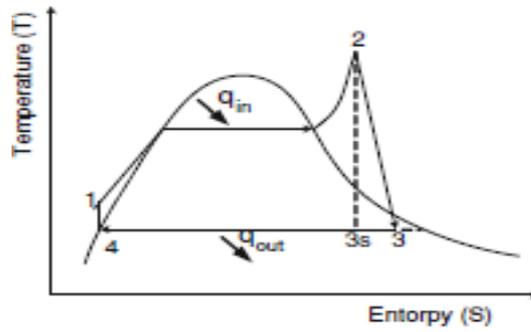
- العملية 1-2: إكتساب حرارة q_{in} في درجة الحرارة ثابتة T_H .
- العملية 2-3: تمدد ثابت الأنثروبي $S_2 = S_3$.
- عملية 3-4: فقدان حرارة q_{out} في درجة الحرارة في درجة حرارة ثابتة T_C .
- عملية 4-1: انضغاط ثابت الأنثروبي $S_4 = S_1$.



الشكل I.1. دورة كارنو [4]

✓ **دورة رانكين** : دورة رانكين يحول الحرارة إلى العمل (الشكل I.2). و يولد حوالي 80% من جميع الطاقة الكهربائية المستخدمة في جميع أنحاء العالم .

- عملية 1-2: يدخل السائل مرتفع الضغط داخل المرجل حيث يتم تسخينه تحت ضغط ثابت من مصدر حرارة خارجي q_{in} ليصبح بخار جاف مشبع .
- العملية 2-3: يتمدد البخار المشبع الجاف من خلال التوربين. هذا يقلل من درجة الحرارة وضغط البخار، و قد يحدث تكاثف.
- العملية 3-4: يدخل البخار الرطب الذي يتم تفرغته من التوربين إلى مكثف حيث يتم تكثيفها في ضغط ثابت لتصبح سائل مشبع ويفقد حرارة q_{out} .
- عملية 4-1: يتم ضخ الماء من الضغط المنخفض إلى العالي لبدء دورة جديدة .



الشكل 2.I . دورة رانكين [4]

I . 6.1 . الطاقة الداخلية

الطاقة الداخلية هي مجموع الطاقات التي تحتويها جزيئات أي نظام ، وهي ترجع إلى التركيب الجزيئي للمواد ودرجة نشاط تلك المادة. فالطاقة الداخلية U تعتبر إحدى خصائص النظام الترموديناميكي، وحدتها الجول (J) ويعطى تغيرها بالعلاقة (3.I) [2] .

$$(I.3) \quad \Delta U = Q + W$$

حيث :

Q : كمية الحرارة التي يكتسبها النظام (J) W : العمل الذي يؤديه النظام (J)

أي أن الطاقة الداخلية لنظام تزيد عند إمداده بحرارة أو عند زيادة الضغط عليه فالطاقة المسلطة عليه من الخارج تختزن فيه (إلى حين تسريبها وأداء شغل). تممنا الطاقة الداخلية لنظام في الترموديناميكا الحرارية لأنها تمكننا من حساب كفاءة عمل الآلات ، مثل محرك الاحتراق الداخلي ، آلة بخارية ، محرك كهربائي ، محرك نفاث ، وغيرها [2] .

I .1.7. الأنتالبي

في الديناميكا الحرارية والكيمياء الجزيئية، المحتوى الحراري أو الأنتالبية أو السخانة (يرمز لها بـ H) هي تعبير عن الكمون الدينامي الحراري للنظام، وتعتبر مقياس للطاقة الكلية لنظام ترموديناميكي وحدته هي الجول (J) [2]. لا يمكن قياس الأنتالبي الكلي (H) لنظام. ولكننا نستخدم التغير في الأنتالبي (ΔH) وهي كمية يمكن قياسها والاستفادة بها أكثر من تعيين قيمتها المطلقة [2]، فإذا كان :

تغير ΔH موجب الإشارة : فيكون تحول ماص للحرارة (endothermique)

تغير ΔH سالب الإشارة : فيكون تحول ناشر للحرارة (exothermique)

يتكون الأنتالبي لنظام من جزئين طاقة داخلية U وشغل ناشئ عن تغير الحجم PV ، فيمكن كتابته بالعلاقة (I.4) [2].

$$(I.4) \quad H = U + PV$$

بإجراء التفاضل على المعادلة أعلاه نحصل على المعادلة (I.5).

$$(I.5) \quad dH = dU + d(PV)$$

I .1.8. الأنتروبي

الأنتروبيا أو العشوائية أصل الكلمة مأخوذ عن اليونانية ومعناها "تحول" وهو مفهوم هام في التحريك الحراري. في الترموديناميكا نقوم بوصف التبادل الحراري (تبادل طاقة) بين النظام والوسط المحيط بالأنتروبيا ، فإما تستبدل حرارة بينهما أو يستبدل شغل، وفي كلا الحالتين أنتروبيا النظام يتغير . يُرمز عادة للأنتروبيا بالحرف (S) ووحدته (J/K) حيث يعطى تغيره في حالة التحولات العكوسة (reversible) بالعلاقة (I.6) [2].

$$(I.6) \quad dS = \delta Q_{rev}/T$$

حيث :

δQ : التغير في مقدار الحرارة النظام (J)

T : درجة حرارة النظام (K)

9.1.1. الحرارة

الحرارة في الفيزياء والكيمياء هي إحدى أشكال الطاقة، يترافق معها حركة الذرات أو الجزيئات أو أي جسيم يدخل في تركيب المادة. يمكن توليد الحرارة عن طريق التفاعلات الكيماوية مثل الاحتراق، أو التفاعلات النووية كالاندماج النووي الحادث في الشمس أو الإشعاع الكهروطيسي كالحاصل في المواقد الكهربائية أو الحركة مثل احتكاك أجزاء الآلات. تنتقل الحرارة بين الأجسام بالإشعاع والتوصيل حراري والحمل الحراري. وتنتقل الحرارة تلقائياً من درجة الحرارة الأعلى للأدنى. فدرجة الحرارة هي مقياس مدى سخونة جسم ما أو برودته، وهي التي تحدد اتجاه انتقال الحرارة تلقائياً، إلا أنه ممكن استنفاد شغل لنقلها في الاتجاه المعاكس. يعبر عن درجة الحرارة بمقاييس مختلفة.

✓ **سلم درجة الحرارة المطلقة** : سلم معياري لدرجات الحرارة يستخدم وحدة كلفن (K). حيث الصفر المطلق يساوي -273.15°C .

✓ **سلم سيلسيوس (C)** : سلم معياري لدرجات الحرارة المئوي، مماثل في تدرجه لسلم درجة الحرارة المطلقة، لكن يعطي الصفر لنقطة التجمد و 100°C نقطة التبخر للماء. يسمى أيضا السلم المئوي لدرجة الحرارة.

✓ **سلم فهرنهايت (F)** : سلم قديم تعطي فيه درجة 32°F لنقطة التجمد و 212°F لنقطة التبخر للماء. هذا السلم هو نظام إنكليزيّ وقلما يستعمل هذا السلم في الأغراض العلمية.

ومن بين الحقائق التجريبية التي اعتمدها العلماء في إنجاز هذه المقاييس القانون الصفري للديناميكا الحرارية الذي ينص على "إذا كان جسمان في حالة اتزان حراري مع جسم ثالث كل على حدا فإنهما يكونان في حالة اتزان حراري فيما بينهما" [2].

10.1.1. I. الغاز المثالي

هو عبارة عن نموذج مبسط للحالة الغازية ويسمى بالغاز الكامل وهو عبارة عن مجموعة من الذرات أو الجزيئات المتماثلة والمستقلة عن بعضها البعض مهملة الأبعاد (نقطية) ذات حجم مهمل أمام الحجم الكلي لا تمارس أي تفاعلات فيما بينها وخاضعة لحركة جزيئية مستمرة وعشوائية. و يوصف من حيث المقادير الثلاث: الحجم الذي يحتله، ضغطه، ودرجة حرارته. في الواقع كل الغازات أو الأبخرة بما في ذلك بخار الماء عند ضغوط منخفضة جدا يسلك سلوك الغاز المثالي. الفائدة العملية لمعالجة الغازات الحقيقية كما المثالية هي إمكانية تطبيق عليه معادلة بسيطة للحالة مع ثابت واحد فقط نحو المعادلتين (7.I) [2].

$$(7.I) \quad PV = mRT$$

حيث:

V: حجم الغاز

m: كتلة الغاز

P: ضغط الغاز

R: ثابت الغازات المثالية وهو يختلف حسب كل غاز اعتماداً على الوزن الجزيئي **M** حسب العلاقة (8.I):

$$(8.I) \quad R = \bar{R}/M$$

تعطى قيمة الثابت **R** ، $R = 8.314 \text{ kJ/kg.K}$

يمكن كتابة المعادلتين (I.7) بالشكل

$$(9.I) \quad PV = n\bar{R}T$$

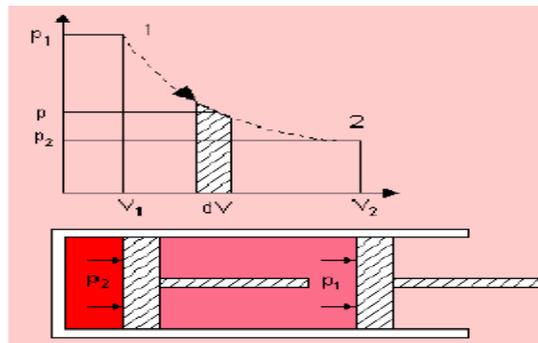
حيث **n**: عدد مولات الغاز

I.11.1. العمل

الشغل الميكانيكي (W_{mech}) هو الطاقة المبذولة للتغلب على قوة ما أو مقاومة. فمثلاً عند بذل طاقة لرفع كتلة، فإن الإحساس العضلي للتغلب على الجذب الأرضي للكتلة (أي وزنها) هو شعور بوجود قوة. وعند بذل طاقة لضغط نابض باليد سيولد شعوراً بوجود مقاومة. فالشغل ينجز حين تتحرك قوة عبر مسافة معينة (**L**) من الوضعية (1) إلى الوضعية (2). يعبر عنه بالعلاقة (I. 10) [2].

$$(10.I) \quad W_{mech} = \int_1^2 F \cdot dL$$

كما يعرف العمل الازاحي على انه العمل المنجز عند تعرض جزء من حدود النظام إلى الإزاحة تحت تأثير الضغط ، مثلا إذا فرضنا وجود كمية من غاز حجمه (**V**) وضغطه (**P**) في اسطوانة محكمة يتحرك بداخلها مكبس مساحة مقطعه العرضي (**A**) عديم التسرب والاحتكاك، تؤثر فيه قوة (**F**) تزيجه من الحالة (1) إلى الحالة (2) بمسافة متناهية الصغر (**dL**) (الشكل I.3).



الشكل I.3. العمل الازاحي لمكبس

فان العمل الازاحي العنصري يعطى بالعلاقة(11.I).

$$(11.I) \quad dW = F \cdot dL = P \cdot A \cdot dL = PdV$$

وبالتكامل نتحصل على العمل الازاحي .العلاقة(12.I).

$$(12.I) \quad \int dW = \int PdV$$

12.1.I. القانون الأول للديناميكا الحرارية

يربط القانون الأول للديناميكا الحرارية بين الطاقات المختلفة وهو تعبير خاص عن قانون الحفظ الطاقة الذي ينص على "أن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث ولكن يمكن تحويلها من صورة إلى أخرى". ويمكن التعبير عنه عند التغير من الحالة الابتدائية إلى الحالة النهائية بالعلاقة.(13.I) [2].

$$(13.I) \quad dU = \delta W + \delta Q$$

بما أن الطاقة الداخلية هي دالة حالة فيمكن كتابة العلاقة (14.I).

$$(14.I) \quad \Delta U = W + Q$$

I. 13.1. القانون الثاني للديناميكا الحرارية :

القانون الثاني للديناميكا الحرارية يلعب دورا في تحديد أوجه القصور في الأنظمة ، وتشير إلى أنه من المستحيل أن يكون كفاءة 100% في تحويل الطاقة.

بعض العمليات تحصل بشكل تلقائي وقسم منها بشكل غير تلقائي فمثلا يبرد الجسم الساخن ولكن لا يسخن الجسم البارد مطلقا، ويمكن للغاز أن يتمدد من المكان المملوء إلى الفراغ ولا يحصل العكس . وبشكل عام تسير جميع النظم إلى حالة التوازن و عكس هذه العمليات يحتاج إلى قوة خارجية أي يجب أن ننجز عمل، ولاتعتبر التغيرات في الطاقة الداخلية أو الأنتالبي مؤشرات يعول عليها للدلالة على قابلية سير العملية، فهي لا تدلنا على موضع الاتزان لهذا نحتاج إلى قانون ثاني يعطينا تفسيراً لذلك ، ولهذا القانون صيغتان[2].

✓ الصيغة الأولى (صيغة كلفن)

من المستحيل إجراء عملية دورية تؤخذ فيها حرارة وتحول إلى شغل دون نقل حرارة في الوقت نفسه من منبع ساخن إلى منبع بارد فمثلا الآلة البخارية لا يمكن أن تقوم بشغل إذا لم يتوفر الضغط العالي ودرجة الحرارة العالية للبخار بالنسبة للوسط المحيط بها.

I.14.1. الإجراءات الانعكاسية واللائنعكاسية (Processus réversibles et irréversibles)

إن الإجراءات أو العمليات التي تحدث آليا في اتجاه معين ولا يمكن لها أن تحدث في الاتجاه المعاكس لتعود الى الوضع الابتدائي تسمى العمليات اللانعكاسية. أما الإجراءات الانعكاسية هو إمكانية عكس العملية الحرارية بحيث إذا أجرينا عملية حرارية على نظام وعكسناها لا يحدث أي تغير في النظام أو المحيط [4]. عمليا لا يوجد عمليات معكوسة وإنما نحاول الاقتراب من جعلها كذلك ومن الأسباب التي تجعل الإجراءات لا انعكاسية هي المعوقات ونذكر منها :

✓ الاحتكاك والتمدد الغير محكوم (امتزاج الغازات).

✓ التمدد في المعادن

✓ التفاعلات الكيميائية [4].

I.2. الانتقال الحراري

تعتبر الحرارة شكل من أشكال الطاقة تعبر على مدى حركية الذرات داخل جسم ما، وهي غير مرئية لكن يمكن الإحساس بها من حولنا، حين عند تماس جسمان مختلفان في درجة الحرارة يلاحظ أن الفرق بين درجتي الحرارة فيهما يتناقص مع مرور الزمن حتى ينعدم، فيقال إن الحرارة قد انتقلت من الجسم الأعلى حرارة إلى الجسم الأقل حرارة. ويحدث مثل ذلك في الجسم الواحد إذا كان جزآن منه في درجتين من الحرارة مختلفتين فنتقل الحرارة من الجزء الساخن إلى الجزء البارد. من الأمثلة على ذلك، عند وضع قطع ثلج (الحرارة لها تكون صفر مئوية أو أقل) إلى داخل وعاء به ماء بدرجة حرارة 30°C يبدأ الثلج بالذوبان إلى أن يصبح للماء داخل الوعاء درجة حرارة واحدة، ذوبان الثلج ينتج عن اكتساب جزيئات الماء المتجمدة حرارة وتحصل عليها من الماء المحيط. هنا يجب التأكيد على أن الطاقة الحرارية مرتبطة بانتقال الطاقة بين الأجسام وليست مقياساً لدرجة حرارة الأجسام، لذا يجب التفريق بين الطاقة الحرارية لجسم ما ودرجة حرارته [2]. وهناك ثلاث طرق رئيسية لانتقال الحرارة .

1.2.I. انتقال الحرارة بالتوصيل

عرف على أنه الإنتقال التلقائي للطاقة الحرارية عبر المادة من منطقة ذات درجة حرارة مرتفعة إلى منطقة أخرى ذات درجة حرارة أقل من سابقتها سعيًا وراء الوصول إلى تجانس حراري. ففي الأجسام الصلبة رديئة التوصيل الكهربائي (العوازل) يتم انتقال الحرارة بفضل قوى المرونة التي تربط بين الذرات التي تهتز حول أوضاع توازنها، فالأمر هنا يقتصر على انتقال الطاقة الاهتزازية عبر الشبكة البلورية للجسم الصلب بشكل فوتونات (photons). أما في الموائع (السوائل والغازات) فيتم انتقال الحرارة بفضل اصطدام الجزيئات الأكثر طاقة حركية بأقلها طاقة. وفي الأجسام الصلبة الجيدة التوصيل الكهربائي (المعادن) يتم انتقال الحرارة بفضل عاملين هما: قوى المرونة التي أشير إليها في حالة الأجسام الرديئة التوصيل الكهربائي، والإلكترونات الحرة وهي إلكترونات حرة الحركة في المعادن وتسلك سلوك الجزيئات في الغازات، وتنتشر خلال المعدن من المنطقة الأكثر حرارة إلى أقلها حرارة ناقلة الطاقة. ونعتمد في الانتقال الحراري بالتوصيل على قانون فورييه [2].

✓ قانون فورييه للانتقال الحراري (Loi de Fourier):

أثبتت التجارب انه وبمجرد وجود فرق في درجات الحرارة بين سطحين فإن هناك انتقالات في الطاقة الحرارية بينهما وتنتقل هذه الطاقة من السطح الساخن إلى السطح البارد، وقد استنتج الفيزيائي فورييه أن معدل التدفق الحراري عبر سطح مادة ما يتناسب مع الفرق في درجة الحرارة ومع مساحة السطح القائم الذي يعبره، وقد سمي بقانون فورييه للتوصيل الحراري يمكن توضيحه بالمعادلة (15.I) [2].

$$(15.I) \quad q = -K. A. dT/dx$$

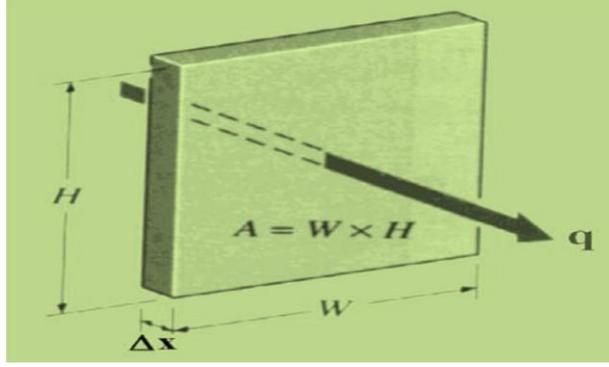
بفصل المتغيرات في المعادلة وإجراء عملية التكامل المحدودة يمكن استنتاج قانون فورييه للتوصيل. العلاقة (16.I).

$$(16.I) \quad q = -K. A(T_1 - T_2)/L$$

K: ثابت الموصلية الحرارية للمادة، والتي هي عبارة عن كمية الحرارة المتدفقة بالثانية الواحدة عند اختلاف درجة حرارة الجسم درجة حرارة مطلقة واحدة، وهي مقدار ثابت لكل نوع من أنواع المواد.

$$T_1 : \text{درجة الحرارة عند النقطة 1} \quad T_2 : \text{درجة الحرارة عند النقطة 2}$$

$$A : \text{مساحة سطح التبادل} \quad L : \text{المسافة بين نقطة 1 ونقطة 2}$$



الشكل 4.I. التوصيل الحراري خلال جدار مكون من طبقة واحدة [2]

2.2.I. انتقال الحرارة بالحمل

يتم انتقال الحرارة في طريقة الحمل نتيجة اختلاف كتلة الحجمية للمائع من منطقة إلى أخرى بسبب اختلاف درجة الحرارة، إذ إن ازدياد درجة الحرارة يرافقه نقصان في الكتلة الحجمية لمعظم الموائع (السوائل والغازات)؛ فإذا زُود المائع بالحرارة من الأسفل ارتفع المائع الأقل كثافة وحل محله الأكبر كثافة، فتحدث تيارات الحمل نقلا للطاقة الحرارية. ويوصف الحمل حينئذ بأنه طبيعي، وإذا استعملت مروحة أو مضخة لتوليد تيارات الحمل والمحافظة عليها كما هي الحال في التدفئة المركزية عادة حينئذ يعتبر انتقال الحرارة بالحمل قسري. وللتعبير عن انتقال الحرارة بالحمل بين سطح ما ومائع يسري حوله نستخدم قانون نيوتن للتبريد [2].

✓ قانون نيوتن للتبريد (Loi de Newton du refroidissement)

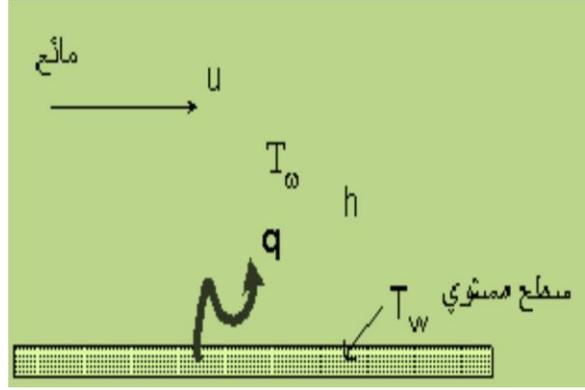
يعطى بالعلاقة (17.I) [2].

$$(17.I) \quad Q = h \cdot A(T_s - T_f)$$

حيث:

h : هو معامل انتقال الحرارة بالحمل ($W/m^2 \cdot K$) A : هي مساحة سطح الشريحة التي تنتقل خلالها الحرارة (m^2)

T_s : درجة حرارة سطح الشريحة T_f : درجة حرارة المائع



الشكل 5.I. انتقال الحرارة بالحمل على سطح مستوي [2]

3.2.I. الانتقال الحراري بالإشعاع

إذا وضع طرف قضيب معدني في لهب فإن الحرارة تصل لليد المسككة به من الطرف الآخر فإن انتقال الحرارة يكون بالتوصيل عبر القضيب ، وإذا وضعت يدك فوق اللهب فإن الحرارة تصل الى يدك فانتقال الحرارة هنا يكون عن طريق تيارات الحمل المتجهة إلى أعلى ، وعند وضع اليد على احد جانبي اللهب نقول أن الحرارة انتقلت عن طريق الإشعاع فجميع الأجسام تشع طاقة حرارية تسمى بطاقة الإشعاع و تحمل هذه الطاقة بواسطة موجات كهرومغناطيسية ، فأشعة الراديو وأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية كلها كهرومغناطيسية تحمل طاقة حرارية وتختلف عن بعضها في طول الموجات ، هذه الموجات تنتقل في خطوط مستقيمة وبسرعة الضوء ولا تحتاج إلى وسيط للانتقال فيه .

كما أن انتقال الحرارة بالإشعاع يمكن أن يتم بين جسمين مفصولين بواسطة درجة حرارة منخفضة جدا ، والدليل على ذلك أن الإشعاع الحراري يصل من الشمس إلى سطح الأرض بعد أن يمر بطبقات باردة جدا من الهواء في طبقات الجو العليا ، وللتعبير عن انتقال الحرارة بالإشعاع نستخدم قانون ستيفان بولتزمان [2].

✓ قانون ستيفان بولتزمان (Loi de Stefan Boltzmann)

وجد ستيفان بولتزمان بالتجربة أن الطاقة المنبعثة من الجسم الأسود لكل متر مربع ولكل وحدة زمن تتناسب طرديا مع القوة الرابعة لدرجة حرارة الجسم مقاسة بالكلفن ويعطى بالعلاقة (18.I) [2].

(18.I)

$$E(T) = \sigma T^4$$

حيث :

E : كمية الحرارة المنتقلة بالاشعاع (J/m².s)

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

3.I الأعداد اللابعديّة في الانتقال الحراري

وقد تم تحديد العديد من العلاقات عمم استخدامها في العمليات الحسابية لنقل الحرارة يعني تحليل الأبعاد والاعتبارات التجريبية. وقد وجد أن بعض المعايير تظهر مجموعة أبعاد مرارا وتكرارا في المعادلات النهائية. التعرف على بعض أهم المعاملات اللابعديّة و

الأكثر استخداما [1] مبينة في (الجدول I. 1).

التطبيق	التعريف	الرمز	الاسم
الحمل الحراري الطبيعي	$G\beta Y^3/\nu^2$	Gr	العدد غارشوف
الحمل الحراري الطبيعي أو القسري، والغليان، أو التكتيف	hY/kf	Nu	العدد نيوسالت
الحمل الحراري الطبيعي أو القسري، والغليان، أو التكتيف	$c\rho\mu/k$	Pr	العدد برانت
الحمل القسري	UY/ν	Re	العدد رينولدز

الجدول I. 1. أهم المعاملات اللابعديّة في الانتقال الحراري [1]

الفصل الثاني

تحويل وتخزين الطاقة

II.1.1. مقدمة

الطاقة هي كيان مجرد لا يعرف إلا من خلال صورته و تحولاته ولها تعريفات مختلفة يمكن من خلالها تقريب مفهومها فهي :

- قدرة المادة على إعطاء قوى قادرة على إنجاز عمل معين .
- مقدرة نظام ما على إنتاج فاعلية أو نشاط خارجي (ماكس بلانك)
- عبارة عن كمية فيزيائية تظهر على شكل حرارة أو شكل حركة ميكانيكية أو طاقة ربط في أنوية الذرة بين البروتون والنيوترون.

وتوجد الطاقة على أشكال مختلفة (كيميائية، ميكانيكية، حرارية، كهربائية). [28]

II.2. أشكال الطاقة

توجد العديد من أشكال الطاقة في الفيزياء نذكر أهمها [4] :

II.2.1. الطاقة الكيميائية : وهي الطاقة التي تربط بين ذرات الجزيئ الواحد بعضها ببعض في المركبات الكيميائية

وهذا النوع من الطاقة متوفر في الطبيعة ، ومن أهم أنواعه النفط والفحم والغاز الطبيعي والخشب .

II.2.2. الطاقة الميكانيكية : وهي الطاقة الناتجة عن حركة الأجسام من مكان لآخر حيث أنها قادرة نتيجة لهذه الحركة

على بذل شغل، والأمثلة الطبيعية لهذا النوع من الطاقة هي حركة الرياح وظاهرة المد والجزر .

II.2.3. الطاقة الحرارية : وتعتبر من الصور الأساسية للطاقة ، ولا تتوفر الطاقة الحرارية بصورة مباشرة في الطبيعة إلا في

مصادر الحرارة الجوفية.

II.2.4. الطاقة النووية : وهي الطاقة التي تربط بين مكونات النواة (البروتونات أو النيوترونات) وهي تنتج نتيجة

تكسر تلك الرابطة وتؤدي إلى إنتاج طاقة حرارية كبيرة جدا .

II.2.5. الطاقة الكهربائية : حيث لا يوجد مصدر طبيعي للكهرباء ، والسبب في ذلك أن جميع المواد تكون متعادلة

كهربائيا ، والطاقة الكهربائية لا تنشأ إلا بتحويل نوع من أنواع الطاقة إلى طاقة كهربائية

II.2.6. الطاقة الضوئية : هي عبارة عن موجات كهرو مغناطيسية تحتوي كل منها على حزم من الفوتونات ، وتختلف

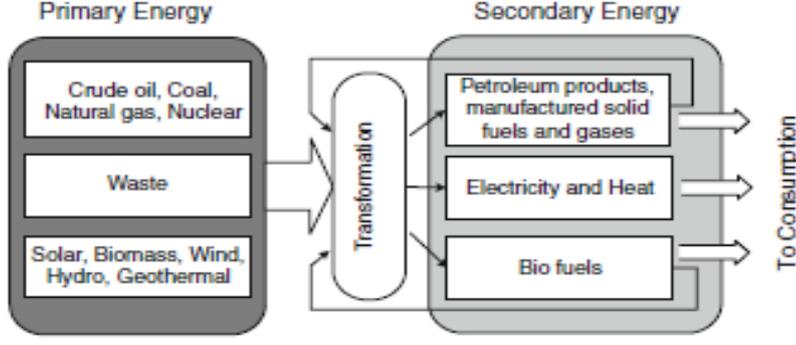
الموجات الكهرو مغناطيسية في خواصها الفيزيائية باختلاف الأطوال الموجية ، ومن الأمثلة عليها الأشعة السينية وكذلك أشعة جاما .

هذه القائمة غير كاملة فيوجد أشكال عديدة من الطاقة لم يتم ذكرها . فمثلا الحرارة والشغل هما صورتان من صور الطاقة فهما ليسا من خصائص النظام ولكنهما يعتبران من حالات نقل الطاقة . فبشكل عام لا يمكن قياس مقدار الحرارة أو الشغل الموجود في كائن ما ، وإنما يتم قياس مقدار الطاقة التي يمكن نقلها بين الأجسام بطرق معينة أثناء وقوع عملية معينة . ويتم إضافة إشارة موجب أو سالب أثناء قياس كل من الحرارة والشغل كإشارة على اتجاه إنتقال الحرارة أو أن الجسم قد قام بشغل أم تعرض له . وتهتم الميكانيكا الكلاسيكية بتوضيح الفرق بين الطاقة الحركية وهي الطاقة التي يمتلكها الجسم بسبب حركته وتساوي الشغل اللازم لتسريع جسم ما من حالة السكون إلى سرعة معينة، سواء كانت سرعة مستقيمة أو زاوية ، وطاقة الوضع و تسمى أيضا طاقة الارتفاع وهي طاقة كامنة يكتسبها الجسم بسبب وقوعه تحت تأثير جاذبية مثل الجاذبية الأرضية أو تحت تأثير مجال كهربائي إذا كان له شحنة كهربائية، وتتغير طاقة وضع الجسم بتغير ارتفاعه عن سطح الأرض . والطاقة النووية بأنواعها كالقوة النووية والقوة النووية الضعيفة . والطاقة الكهربائية والتي تحدث نتيجة تعرض الجسم للمجالات الكهربائية . والطاقة المغناطيسية والتي تحدث نتيجة تعرض جسم ما لمجال مغناطيسي .

II.3. الطاقة الأولية والطاقة الثانوية

الطاقة الأولية هي التي يتم استخراجها مباشرة من الطبيعة مثل النفط ويمكن تحويل الطاقة الأولية بطرق معينة إلى أشكال

أخرى للطاقة وتسمى طاقات ثانوية مثل الكهرباء والحرارة. (الشكل II.1) [4].



الشكل 1.II. الطاقة الأولية والطاقة الثانوية [4]

4.II. مصادر الطاقة:

تقسم مصادر الطاقة إلى مصادر طبيعية دائمة متجددة؛ كالشمس والرياح والمياه والنباتات، ومصادر غير متجددة وقابلة للنفاذ؛ كالوقود الأحفوري بجميع أنواعه [4].

1.4.II. مصادر الطاقة غير المتجددة :

الطاقة غير المتجددة أو ما يعرف بالوقود الأحفوري هي التي تنفذ عند استخدامها، إذ تكون ذات كميات محدودة المصدر، وتكون قد تكونت في الأرض منذ ملايين السنين ولها مخزون محدد سينتهي باستهلاكه، ولا يمكن تجديدها في فترة زمنية قصيرة. تكون هذا النوع من الوقود في العصور الجيولوجية القديمة وخاصة في العصر الكربوني (Carboniferous era) منذ ما يزيد عن 200 مليون سنة. ويعتقد أنها تكونت من بقايا الكائنات الحية النباتية والحيوانية الكبير منها والمجهرية، التي دفنت تحت طبقات القشرة الأرضية وتآحفت. وساعد عاملاً الضغط والحرارة عبر ملايين السنين على تحويلها إلى الفحم والنفط والغاز الطبيعي ويتم تخزينها في الصخور الخازنة. ونبين فيما يلي المصادر الرئيسية للطاقة غير المتجددة [4]:

✓ الفحم: الفحم هي الصخور الرسوبية التي تحتوي على مواد قابلة للاشتعال. ويختلف الفحم في تكوينه ومحتواه الطاقوي على حسب المصدر والنوع. ويبين (الجدول 1.II) أدناه بعض الخصائص النموذجية للفحم المختلفة

فحم الليجينيت (Lignite)	فحم البتومييني (Bituminous)	فحم الانتراسيت (Anthracite)	
31.4	78.2_44.9	85.7_80.5	نسبة الكربون الثابت من الوزن (%)
39	15.9_2.2	16.3_2.8	نسبة الرطوبة من الوزن (%)
11.7_3.3	11.7_3.3	20.2_9.7	نسبة الرماد من الوزن (%)
0.4	4.0_0.7	0.77_0.6	نسبة الكبريت من الوزن (%)

جدول 1.II. يقدم خصائص نموذجية لفحوم مختلفة [4]

✓ النفط: (النفط الخام) النفط هو سائل قابل للاشتعال بشكل طبيعي يتكون من خليط معقد من الهيدروكربونات من مختلف الأوزان الجزيئية، والمختلفة الخصائص الفيزيائية والكيميائية، مثل قيمة التدفئة واللون واللزوجة.

✓ الغاز الطبيعي: الغاز الطبيعي خليط طبيعي، ويتكون من خليط من المركبات الغازية، أهمها غاز الميثان والإيثان والبروبان والبيوتان، ويدخل الغاز الطبيعي كوقود في الصناعات ذات الاستخدام الكثيف للطاقة مثل صناعة الإسمنت وإنتاج الكهرباء وصناعة الحديد والصلب وغيرها.

✓ الطاقة النووية: محطات الطاقة النووية تولد الطاقة عن طريق انشطار الوقود النووي، مثل اليورانيوم. الانشطار النووي هو التفاعل النووي الذي يتم فيه تقسيم نواة الذرة إلى أجزاء أصغر، وغالبا ما تنتج النيوترونات والفوتونات الحرة في شكل أشعة غاما، وتحرر كميات كبيرة من الطاقة. الوقود النووي يخضع للانحلال عندما يضرب بالنيوترونات الحرة فتحرر طاقة بمعدل التحكم في المفاعل النووي [4]. وتستخدم هذه الحرارة مثلا لإنتاج البخار من أجل تدوير التوربينات.

2.4.II. مصادر الطاقة المتجددة

الطاقة المتجددة هي الطاقة المستمدة من الموارد الطبيعية التي تتجدد أي التي لا تنفذ. تختلف جوهريا عن الوقود الأحفوري من بترول وفحم وغاز طبيعي، أو الوقود النووي الذي يستخدم في المفاعلات النووية. ولا تنشأ عن الطاقة المتجددة عادةً مخلفات كثنائي أكسيد الكربون (CO_2) أو غازات ضارة أو تعمل على زيادة الاحتباس الحراري كما يحدث عند احتراق الوقود الأحفوري أو المخلفات الذرية الصّارة الناتجة عن المفاعلات النووية.

وتنتج الطّاقة المتجددة من الرياح والمياه والشمس، كما يمكن إنتاجها من حركة الأمواج والمد والجزر أو من طاقة حرارية أرضية وكذلك من المحاصيل الزراعية والأشجار المنتجة للزيوت. إلا أن تلك الأخيرة لها مخلفات تعمل على زيادة الاحتباس الحراري. حالياً أكثر إنتاج للطّاقة المتجددة يُنتج في محطات القوى الكهرومائية بواسطة السدود العظيمة أينما وجدت الأماكن المناسبة لبنائها على الأنهار ومساقط المياه ، وتستخدم الطّرق التي تعتمد على الرياح والطّاقة الشمسيّة طرق على نطاق واسع في البلدان المتقدّمة وبعض البلدان النامية ؛ لكن وسائل إنتاج الكهرباء باستخدام مصادر الطّاقة المتجددة أصبح مألوفاً في الآونة الأخيرة، وهناك بلدان عديدة وضعت خططاً لزيادة نسبة إنتاجها للطّاقة المتجددة، مصادرها الرئيسية [4] هي:

✓ **الطاقة الكهرومائية:** تعتمد محطات الطاقة المائية على الطاقة الكامنة للمياه المنحصرة . حيث ان استطاعة المياه المستخرجة تعتمد على الحجم وفرق الارتفاع بين مصدر المياه ومستوى تدفقها. ومنه فكمية الطاقة الكامنة للماء تتناسب مع الارتفاع. ومن المزايا الرئيسية لتوليد الطاقة الكهرومائية هو التخلص من الوقود الملوث. لأنه لا يوجد احتراق للوقود، وبالتالي تلوث قليل مقارنة مع الوقود الأحفوري وتلوث محدود بالمقارنة مع محطات الطاقة النووية. عادة تستعمل محطات الطاقة الكهرومائية السدود الكهرومائية الكبيرة (الشكل 2.II).



الشكل 2.II. محطة طاقة كهرومائية

✓ **الطاقة الشمسية:** الطاقة الشمسية تستمد من الشمس على شكل إشعاع شمسي. ومن بين استعمالاتها تدفئة وتبريد المحيط والمباني من خلال الهندسة المعمارية الشمسية، الإضاءة النهارية، تسخين الماء والطبخ الشمسي والصناعات الحرارية بدرجات حرارة مرتفعة. وتعتمد تقنيات الطاقة الشمسية على استخدام اللاقطات الشمسية (capteurs solaires) الحرارية أو الخلايا الشمسية . سنعرض بعض الأنظمة التي تعمل بالطاقة الشمسية [4]:

• نظام تسخين المياه بالطاقة الشمسية : يعتمد على لاقط الطاقة الشمسية (الشكل 3.II) الذي يعمل مع مضخة،

ومبدلات حرارية بالإضافة إلى صهريج أو أكثر لتخزين الحرارة. وهذه اللواقط عموماً تتكون (1) لوح مسطح داكن لامتصاص الطاقة الشمسية، (2) غطاء شفاف يسمح للطاقة الشمسية بالمرور ولكنه يقلل من فقدان الحرارة، (3) سائل لنقل الحرارة (الهواء، مضاد التجمد، أو الماء) لإزالة الحرارة من لوح الامتصاص، (4) داعم أو غطاء لعزل الحرارة. ويتكون لوح الامتصاص من صحيفة امتصاص رقيقة (من بوليمرات ثابتة حرارياً، ألومنيوم، صلب أو نحاس، والتي يتم طلاؤها بطلاء أسود لامع أو انتقائي) مدعومة في كثير من الأحيان بشبكة أو ملف من أنابيب بها سائل موضوعة في غلاف معزول من الزجاج أو غطاء من البولي كربونات. وفي ألواح تسخين المياه، عادة ما يتم تمرير السائل خلال أنابيب لنقل الحرارة من لوح الامتصاص إلى خزان مياه معزول. وقد يتحقق ذلك مباشرة أو عن طريق مبادل حراري



الشكل 3.II. لاقط الطاقة الشمسية (capteurs solaires) [4]

• نظام توليد الكهرباء باستخدام مركبات اسطوانية قطع مكافئة (Collecteurs paraboliques) : يقوم على

استخدام مركبات اسطوانية قطع مكافئة (parabolic trough collectors) لجمع الطاقة الشمسية من اجل توليد

البخار (الشكل 4.II).



الشكل 4.II. أحواض ذو قطع مكافئ (Paraboliques) لتجميع الطاقة الشمسية [4]

- نظام الطاقة الشمسية الضوئية (Photovoltaïque) : يتم فيه تحويل الضوء باستخدام مواد أنصاف نواقل (الخلايا الضوئية أو الخلايا الشمسية) (الشكل 5.II). فالخلايا الشمسية هي عبارة عن محولات فولتضوئية تقوم بتحويل ضوء الشمس المباشر إلى كهرباء ، وهي شبه موصلة وحساسة ضوئياً ومحاطة بغلاف أمامي وخلفي موصل للكهرباء تصنع الخلايا الكهروضوئية عادة من السليكون المعالج كيميائياً (السليكون هو نفس مادة الرمل الموجودة على الشواطئ والصحاري في جميع أنحاء العالم)، وهي تعمل على تحويل ضوء الشمس مباشرة إلى طاقة كهربائية، فعندما يقع الضوء الشمسي على الخلية الكهروضوئية يتحرر منها الكترون، وتُجمَع الالكترونات المحررة في أسلاك موصلة بالخلية فتنتج تياراً كهربائياً .



الشكل 5.II. خلايا ضوئية [4]

- ✓ طاقة الكتلة الحيوية: الكتلة الحيوية هي المواد العضوية المصنوعة من النباتات، بما في ذلك الحيوانات المجهرية. حيث تمتص النباتات طاقة الشمس في عملية التركيب الضوئي وتخزن الطاقة على شكل كتلة حيوية. الكتلة الحيوية هي مصدر الطاقة المتجددة أساسها دورة الكربون. بعض الأمثلة عن وقود الكتلة الحيوية كالخشب، المحاصيل والطحالب. عند احتراقها، يتم تحرير الطاقة الكيميائية الموجودة في الكتلة الحيوية على شكل حرارة (الشكل 6.II). .



الشكل II.6. الكتلة الحيوية [4]

✓ **طاقة الرياح:** الرياح هي مصدر متجدد للطاقة تماما دون ملوثات ، حيث تعتمد على استعمال طاحونات هوائية توجد على أشكال مختلفة (الشكل II.7) . معظم الطاقة المخزنة في حركات الرياح تكون على ارتفاعات عالية حيث سرعة الرياح المستمرة لأكثر من 160 كم / ساعة (99 ميلا في الساعة). ولكن مشكلة هذا المصدر هو عدم القدرة على التنبؤ الحقيقي بالرياح.



الشكل II.7. طاحونات هوائية

✓ **طاقة الحرارة الأرضية:** الطاقة الحرارية الأرضية هي الحرارة الناتجة من التحلل الإشعاعي للمعادن، والنشاط البركاني وكذا الطاقة الممتصة على السطح (الشكل II.8).السطح الطاقة الحرارية الأرضية هي طاقة مستدامة وتحترم البيئة.



الشكل II.8. الحرارة الجوفية [4]

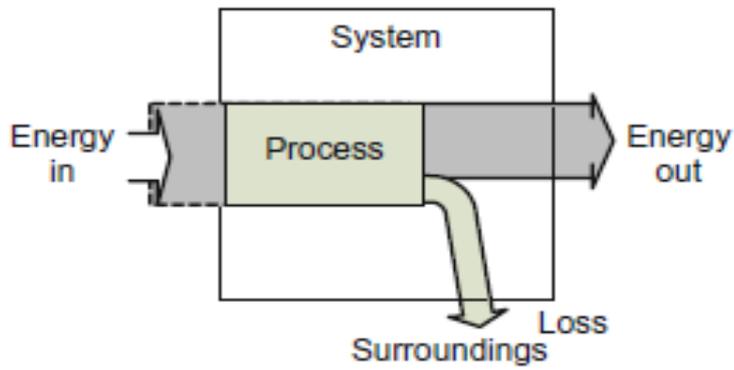
✓ طاقة المحيطات (المد والجزر): تعتمد على الطاقة الناتجة من ظاهرة حركة الأمواج (المد والجزر) وهي تكنولوجيا متجددة وغير ملوثة.

✓ الطاقة الهيدروجينية: الهيدروجين هو أبسط ذرة حيث تتواجد ذرات الهيدروجين في قلب الشمس ، تتجمع لتشكيل ذرات الهليوم (وتسمى عملية الصهر) وتوفر الطاقة المشعة، تحافظ هذه الطاقة الإشعاعية على الحياة على وجه الأرض ، ويتم تخزينها كمصدر من مصادر الطاقة الكيميائية. فالهيدروجين لديه محتوى طاقي عالي وهذا راجع لوزنه. ومن ميزات أنه ينقل الطاقة في شكل قابل للاستعمال من مكان إلى آخر، و احتراقه نظيف فهو ينتج الماء (H_2O)، ويعتبر طاقة متجددة مثل الطاقات الأخرى المتجددة.

II.5. تحويل الطاقة

في معظم العمليات، الطاقة في تغير مستمر من شكل إلى آخر، ويدعى ذلك بتحويل الطاقة. ويمكن ان تحدث عدة تحويلات مختلفة ومتسلسلة للطاقة من شكل إلى آخر للوصول إلى شكل الطاقة الذي نستعمله مباشرة. حيث خلال جميع أشكال التحويل تبقى الطاقة محفوظة في النظام. يمكن تحويلها جميع أشكال الطاقة بالكامل إلى حرارة، ولكن التحويل إلى شكل غير حراري من الطاقة لا يمكن أن تكون كاملة نظرا لعدم الكفاءة مثل الاحتكاك، والضياع في الحمولة وعوامل أخرى فمع كل تحويل طاقي

جزء من الطاقة يضيع على شكل تحويل غير مفيد في شكل طاقة حرارية يمكن تخزينها كما هو موضح في (الشكل 9.II). وهذا يدل على أن هناك حدودا لكفاءة تحويل الطاقة. [4]



الشكل 9.II. تحول وضياع الطاقة [4]

هناك العديد من العمليات والأجهزة المختلفة التي تحول الطاقة من شكل إلى آخر. ويعرض (الجدول 2.II). قائمة قصيرة من هذه العمليات والأجهزة .

من الطاقة	الى الطاقة المفيدة	عملية او جهاز التحويل
حرارية	ميكانيكية	المحرك البخاري
حرارية	كهربائية	حرارة المحيطات
حرارية	كهربائية	الحرارة الجوفية
شمسية	كيميائية	التركيب الضوئي
جاذبية كامنة	كهربائية	السدود الكهرومائية
ميكانيكية	كهربائية	المنوب الكهربائي أو الدينامو
ميكانيكية	كهربائية	الطواحين الهوائية
ميكانيكية	كهربائية	الامواج البحرية
كيميائية	ميكانيكية	محرك الديزل
كيميائية	ميكانيكية	النشاط العضلي
كيميائية	كهربائية	البطارية
كيميائية	كهربائية	خلايا الوقود
كيميائية	كهربائية	النبض العصبي
كيميائية	ضوئية	التألق البيولوجي
كهربائية	ميكانيكية	المحرك الكهربائي
كهربائية	حرارية	المقاومة الحرارية
كهربائية	ضوئية+حرارية	المصباح الكهربائي
حركية	حرارية	الاحتكاك
اجهادية	كهربائية	الكهروضغطية

الجدول 2.II. بعض عمليات وأجهزة تحويل الطاقة [4]

6.II. تخزين الطاقة

السباق العالمي على الطاقة كبير جدا بسبب الطلب العالمي على الطاقة إلى جانب وجود استعداد لخفض انبعاث غازات الدفيئة. الفترة الحالية هي فترة انتقالية للطاقة تتمحور حول تنويع مصادر الطاقة، حيث توفر الطاقة واستقرار الشبكات هي شرط لا غنى عنه لميزان النظام الكهربائي. أي بصيغة أخرى مفهوم المرونة أو الموازنة بين الإنتاج والاستهلاك ضروري أيضا لتغطية الاحتياجات في الوقت الحالي.

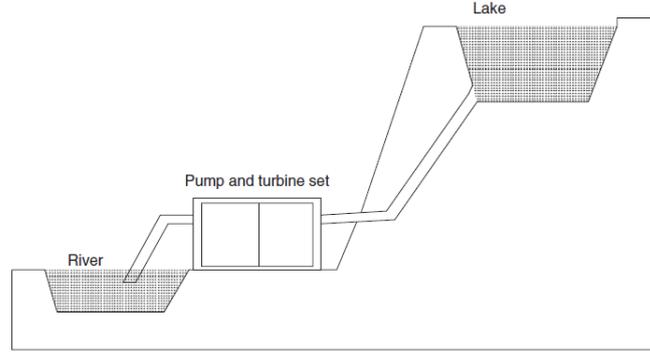
ونظرا إلى الاستنزاف السريع لموارد الطاقة الأحفورية والطلب الزائد للطاقة، بدأت الكثير من الأبحاث حول العالم توجيه النظر والاهتمام بالطاقات المتجددة وأنظمة تخزين الطاقة. بشكل عام، تخزين الطاقة هو وضع الطاقة في مكان محدد خلال فترات الوفرة بالزيادة أو الأقل تكلفة (طاقة الشمس، ومعدلات الليل...) لاستخدامها لفترة الطلب أو أكثر تكلفة [5]، وإذا تكلمنا عن تخزين الطاقة عموما، فانه يمكن تخزين الطاقة بأشكال مختلفة أهمها: تخزين على شكل طاقة ميكانيكية، طاقة كيميائية، طاقة كهربائية و طاقة حرارية [1].

1.6.II. تخزين الطاقة الميكانيكية :

الطاقة الميكانيكية يمكن تخزينها في شكل طاقة حركية انسحابية أو حركة دورانية، او في شكل طاقة كامنة (مثل طاقة ضغط أو تشوه مادة مرنة، أو طاقة ضغط في الغاز). من الصعب تخزين كميات كبيرة من الطاقة في حركة إنسحابية لكن من السهل تخزين الطاقة الحركية الدورانية. في الواقع، عجلة الخزاف، ربما هي أول شكل من أشكال تخزين الطاقة التي يستخدمها الإنسان، وهناك ثلاث أنظمة رئيسية لتخزين الطاقة الميكانيكية.

✓ نظام الضخ المائي

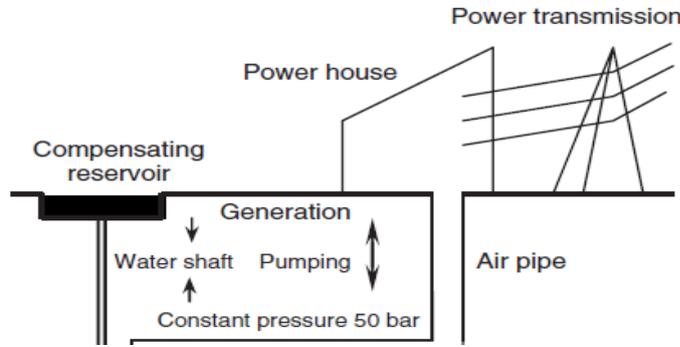
في الليل، عندما يكون الطلب على الطاقة منخفض، المضخات تضخ المياه عبر أنابيب إلى الخزان العلوي. خلال النهار، عندما يكون الطلب على الطاقة عالي، المياه الموجودة في الخزان يسمح لها بالتدفق إلى الخزان السفلي فتعمل المياه المتدفقة على تدوير التوربينات لتوليد الكهرباء. المضخة التي تضخ الماء إلى الأعلى يمكن أن تعمل بالطاقة الشمسية خلال النهار. كفاءة محطة تخزين المياه حوالي 50%. عندما يتم ضخ المياه يفقد نحو 30% من الطاقة، و عندما يتدفق الماء إلى أسفل، يتم فقدان حوالي 20% أخرى من الطاقة. استعملت لعدة آلاف من السنين الماضية، ولا يزال استخدامها لحد الآن. (الشكل 10.II).



الشكل 10.II. نظام الضخ المائي [1]

✓ نظام الهواء المضغوط

في هذا النظام ، يتم ضغط الهواء أثناء ساعات الذروة وتخزينها في خزانات كبيرة تحت الأرض ، والتي قد تكون من الكهوف التي تحدث بشكل طبيعي، وقباب الملح، وأعمدة المناجم المهجورة، وحقول الغاز والنفط المستنفذة، أو الكهوف التي من صنع الإنسان. خلال ساعات الذروة، يتم تحرير الهواء لتشغيل مولد توربينات الغاز. ونستفيد من تقنية تخزين الهواء المضغوط بشكل عام من قدرة توليد الكهرباء خارج الذروة باستخدام التوربينات الغازية بنفس الطريقة التي تستخدم فيها مخزونات تدوير التوربينات المائية. ومع ذلك، مع أنظمة الغاز، فالحرارة المتولدة عندما يتم ضغط الهواء قد يتم تخزينها واستخدامها لتسخين الهواء ، وبالتالي زيادة الكفاءة (الشكل 11.II) .



الشكل 11.II. نظام الهواء المضغوط [4]

✓ نظام الحدافة (دولاب الموازنة)

استخدمت منذ فترة طويلة عجلة دولاب الموازنة، وهي عجلة ذات كتلة كبيرة نسبياً تخزن الطاقة الحركية الدورانية . يمكن تصميم هذا الجهاز للعمل على حد سواء كمحرك عندما تغذيه الطاقة الكهربائية ومولد عندما يحول الطاقة الميكانيكية. ويمكن استخدام الحدافات لتخزين الطاقة في وسائل النقل ، خاصة في المركبات البرية (مثل الحدافات). كما يمكن أن يكون للحدافات ميزة كبيرة في السيارات التي تخضع لعمليات (انطلاق / إيقاف) متكررة كما هو الحال في حركة المرور في المناطق الحضرية. الفكرة الأساسية

هي أنه مع حذافة، يحدث تباطؤ لتحويل الطاقة الميكانيكية إلى حرارة عند احتكاك الفرامل . بدلا من ذلك، يتم تخزين الطاقة الحركية عن طريق الحذافة. وتبين (الصورة 12.II) دولاب الموازنة التي تم تصميمها بنجاح وبنيت في معهد النقل بنسلفاني.

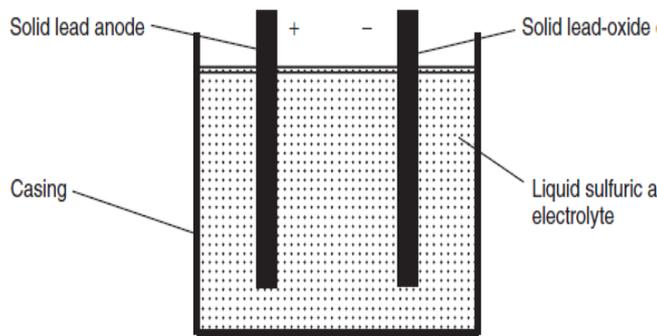


الصورة 12.II . دولاب الموازنة [4]

2.6.II. تخزين الطاقة الكيميائية

قد يتم تخزين الطاقة في أنظمة تتألف من واحد أو أكثر من المركبات الكيميائية التي تفرز أو امتصاص الطاقة عندما تتفاعل لتشكيل مركبات أخرى. تعتبر البطاريات هي أساس تخزين الطاقة الكيميائية . وغالبا ما يشار إلى الطاقة المخزنة في البطاريات بالطاقة الكهروكيميائية، لأن التفاعلات الكيميائية في البطارية سببها الطاقة الكهربائية ثم تنتج لاحقا طاقة كهربائية. بعض أنظمة تخزين المواد الكيميائية يتم شحنها حراريا وتفريغها. فالعديد من التفاعلات الكيميائية هي ماصة للحرارة ، وبالتالي عندما تكون درجة حرارة النظام منخفض عن قيمة معينة، الطاقة المخزنة في النظام خلال التفاعل الأصلي يتم تحريرها عند التفاعل العكسي وهكذا، يتم تخزين الطاقة عن طريق استخدام حرارة تفاعل المواد الكيميائية .

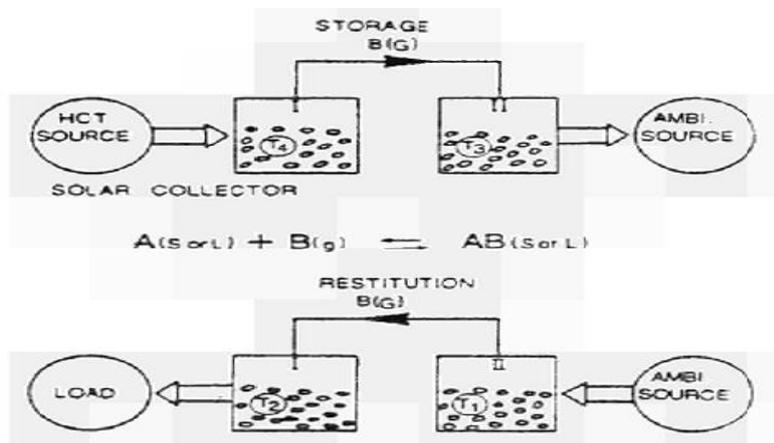
البطاريات متوفرة تجاريا في العديد من الأنواع والأحجام، تختلف حسب الوزن، خصائص الأداء والتكلفة. فنجد مثلا (بطاريات الرصاص الحمضية، بطاريات كبريتيد ليثيوم الحديد، بطاريات الصوديوم والكبريت،.....) ، لكن النوع الأكثر شيوعا هو بطاريات الرصاص الحمضية. (الشكل 13.II) .



الشكل 13.II . بطارية الرصاص الحمضية [1]

ويعد إنتاج مادة كيميائية قابلة للتخزين تقنية مهمة جدا ويعتبر أبسط عنصر كيميائي للتخزين هو الهيدروجين. الهيدروجين يمكن أن ينتج عن طريق التحليل الكهربائي للماء أو عن طريق التفاعلات الكيميائية المباشرة ، هذا الهيدروجين يمكن استخدامه كوسيلة للتخزين. ووقود لتوليد الكهرباء .

بالإضافة إلى البطاريات يوجد نظام تخزين كيميائي آخر وهو المضخة الحرارية الكيميائية، حيث يستند مبدأ مضخة الحرارة الكيميائية على اقتران اثنين من التفاعلات الكيميائية، هذه التفاعلات تحدث في خزائنين منفصلين يتصل كل خزان مع مصدر حراري. الطور الغازي يضمن نقل الطاقة بين الخزائنين (التحلل في خزان، وامتصاص في الآخر، في درجات الحرارة المختلفة). لذلك في وجود وتعمل مضخة الحرارة يمكن استخدامها في التخزين، عن طريق اختيار بعناية عزم الدوران وإمكانية نقل الحرارة من مصدر بارد إلى ساخن [6]. (الشكل 14.II).



الشكل 14.II . مبدأ عمل مضخة حرارية كيميائية [6]

3.6.II. تخزين الطاقة الحرارية (TES)

في الوقت الحالي ينظر إلى تخزين الطاقة الحرارية كطاقة جديدة يتم تطوير تقنياتها وتطبيقاتها الموسعة. (TES) هو التخزين المؤقت لطاقة عالية أو منخفضة الحرارة لاستخدامها في وقت لاحق. أمثلة على ذلك هي تخزين الطاقة الشمسية للتدفئة من حرارة الصيف لاستخدامها في الشتاء أو من الجليد الشتوي لتبريد المحيط في الصيف، واستخدامها لتوليد الكهرباء خلال ساعات خارج الذروة لاستخدامها خلال ساعات الذروة اللاحقة عند الطلب. الطاقة الشمسية، على عكس الوقود الأحفوري غير متوفر في جميع الأوقات ، (TES) يمكن أن يكون وسيلة هامة لتعويض عدم التوافق بين توافر الطاقة الحرارية والطلب .

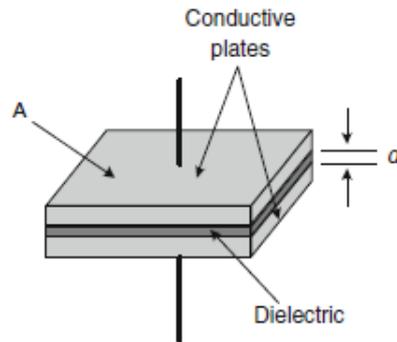
تعتمد أنواع تخزين الطاقة المدروسة سابقا على الطاقة الكهربائية، في أنظمة توليد الكهرباء بالحرارة، (TES) يوفر إمكانية تخزين الطاقة من قبل وتحويلها إلى كهرباء. حيث ان جودة الطاقة تقاس بدرجات حرارة المواد التي تدخل. على سبيل المثال، تخزين كيلواط ساعة واحدة من الطاقة بتسخين 10kg من الماء عند درجة حرارة 86°C .

يجدر الإشارة إلى أن جودة الطاقة المخزنة في النظام التخزين الميكانيكي أعلى من ذلك، على سبيل المثال، يمكن أيضا تخزين كيلوواط ساعة واحدة من الطاقة عن طريق رفع طن واحد من المياه إلى ارتفاع حوالي 314 م. وتختلف طلبات الطاقة في القطاعات التجارية والصناعية والمرافقية والسكنية على أساس يومي، أسبوعي، وموسمي. لذا يتطلب استخدام تقنيات تخزين الطاقة الحرارية أن تكون متوافقة بدقة لكل تطبيق محدد. استخدام مثل هذه التقنيات الحرارية لأغراض التدفئة ، وتسخين المياه والتبريد وتكييف الهواء، تلقى مؤخرا اهتماما كبيرا، وتطور على مدى العقود القليلة الماضية في البلدان الصناعية [1] .

هذه التقنيات ستناقش بالتفصيل في الفصل الموالي .

II.4.6. تخزين الطاقة الكهربائية:

✓ بطريقة مباشرة : باستعمال المكثفات وهي جهاز لتخزين الشحنة الكهربائية واستخدامها كجزء من الأنظمة الكهربائية. أشكال المكثفات العملية تختلف على نطاق واسع، حيث تعتمد في عملها على الحقل الكهربائي الناشئ في وجود فرق في الجهد الكهربائي [1]. ويبين (الشكل II.15) نموذج لوحة مسطحة لمكثفة.



الشكل II.15. نموذج لوحة مسطحة لمكثفة [1]

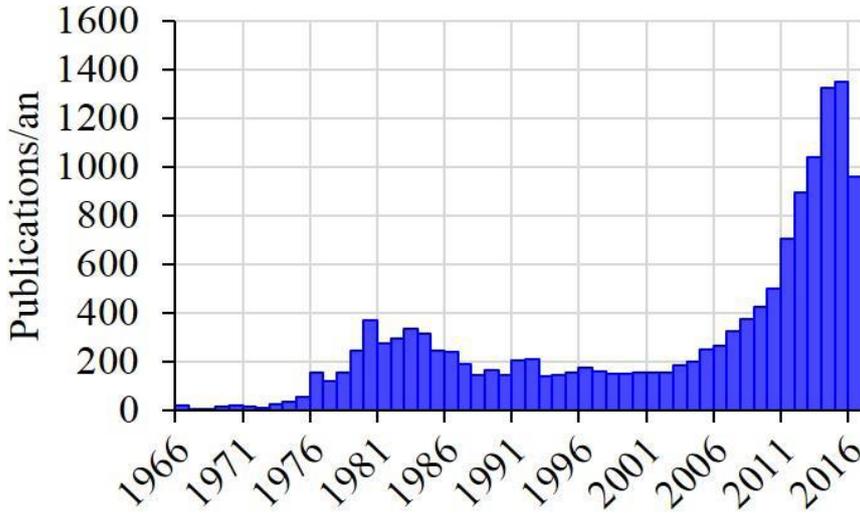
✓ بطريقة غير مباشرة : عند وجود فائض في الشبكة الكهربائية يمكن تخزين هذه الطاقة الكهربائية الزائدة خارج ساعات الذروة في شكل آخر من أشكال الطاقة لاستغلالها في ساعات زيادة الطلب. حيث تخزن في عدة أشكال من أهمها التخزين في شكل ميكانيكي (الضخ المائي ، الهواء المضغوط)، وكيميائي (البطاريات ،التفاعلات الكيميائية الماصة للحرارة) أو حراري كما سبق شرحها سلفا .

الفصل الثالث:

أنظمة التخزين الحراري

III. 1. مقدمة :

عندما بلغت أزمة البيترول ذروتها إثر أزمة 1973 بدأ تخزين الطاقة الحرارية في الظهور و الإزدهار في الثمانينات لكن سرعان ماتراجعت فوائد تخزين الطاقة الحرارية بانخفاض سعر البيترول، كما إزدادت عدد الدراسات المنشورة في هذا المجال منذ بداية هذه الألفية (الشكل III-1). من جهة أخرى وبسبب إزداد الطلب العالمي على الطاقة وتذبذب الموارد الطاقوية الأحفورية والتغير المناخي في العشرينات الأخيرة أصبح من الضروري ترشيد إستهلاك الطاقة في مجتمعاتنا فتخزين الطاقة يبدو عاملا واعدا بالنسبة لمستقبل الطاقة المنخفضة الكربون وبالخصوص تخزين الحرارة بالنسبة ليوم أو عدة شهور والذي يعتبر حلا مهما في ما يخص تامين الطاقة .



الشكل III.1 . عدد الأبحاث المنشورة سنويا عن تخزين الطاقة الحرارية [9]

III. 2. تخزين الطاقة الحرارية :

يقوم على عدد من التقنيات التي تخزن الطاقة الحرارية في مستودعات تخزين الطاقة ل يتم استخدامها لاحقًا. وتستخدم تلك الطاقة المخزنة في معادلة الطلب على الطاقة بين النهار و الليل. و يمكن حفظ المخزون الحراري عند درجة حرارة أعلى (أسخن) أو أقل (أبرد) من درجة الحرارة المحيطة. ومن إستخدامات الطاقة المخزنة اليوم نجد إنتاج الثلج أو الماء المبرد أو المحاليل سهلة الانصهار في الليل أو الماء الساخن الذي يستخدم لاحقًا في البيئات الباردة أو الساخنة أثناء النهار.

تُجمع الطاقة الحرارية في الغالب من مجمع الطاقة الشمسية الحرارية النشط أو في الأغلب في ترسانات الحرارة والطاقة ثم تنقل إلى

مستودعات معزولة لتستخدم لاحقاً في التطبيقات المختلفة، مثل أجهزة التدفئة أو التدفئة المنزلية أو في سخانات تدفئة المياه

- فتخزين الطاقة الحرارية يعني أساساً الحرارة الصادرة من الشمس ، كما تعني أيضاً الحرارة الناتجة صناعياً مثل : الغاز المركزي و مفاعل

الإحتراق و إستخراج المعادن . يمكن تقسيم تقنيات تخزين الطاقة الحرارية الى عدة أقسام (الشكل III-2) وذلك حسب معايير

مختلفة : [9]

✓ المعيار 1 : اذا كان المعيار هو درجة الحرارة فإن أنظمة التخزين تنقسم إلى قسمين هما :

أنظمة تخزين الحرارة و أنظمة تخزين البرودة

✓ المعيار 2 : اذا كان المعيار هو مدة التخزين نجد قسمين من أنظمة تخزين الحرارة هما :

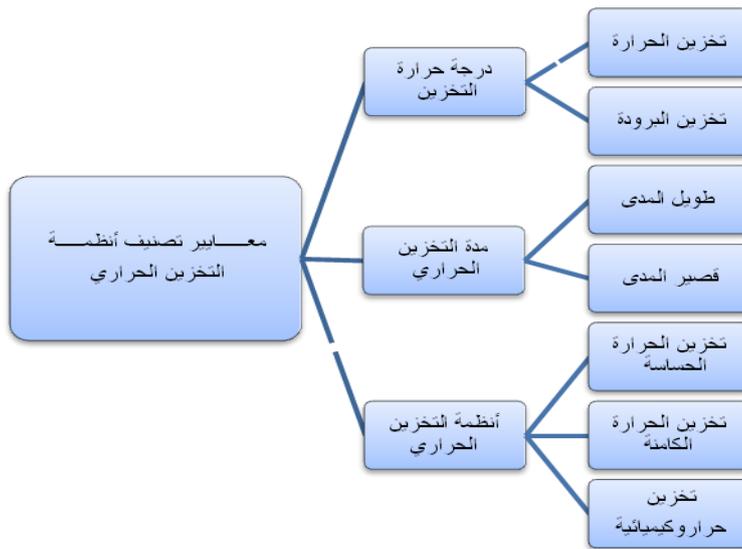
تخزين مدى طويل و تخزين مدى قصير .

✓ المعيار 2: من جهة اخرى إذا كان المعيار هو نظام التخزين المخزنة فإنه يوجد ثلاث انواع من تخزين الطاقة الحرارية و هي :

- التخزين بالحرارة الحساسة .
- التخزين بالحرارة الكامنة .
- التخزين بالحراروكيميائية .

- كما يمكن تصنيف أنظمة تخزين الطاقة الحرارية إلى صنفين هما :

النشط ويستعمل في حالة مادة التخزين تتحرك في النظام و غيرالنشط تكون المادة المستعملة في التخزين حاملة لا تتحرك في النظام .



الشكل III.2. :مخطط تصنيف معايير أنظمة تخزين الطاقة الحرارية [9]

III. 3. فوائد تخزين الطاقة الحرارية :

إن تخزين الطاقة على شكلها "الحراري" هو الأداة التي يمكن أن تشارك في القدرة التنافسية للكثير من المجالات والتقنيات مثل

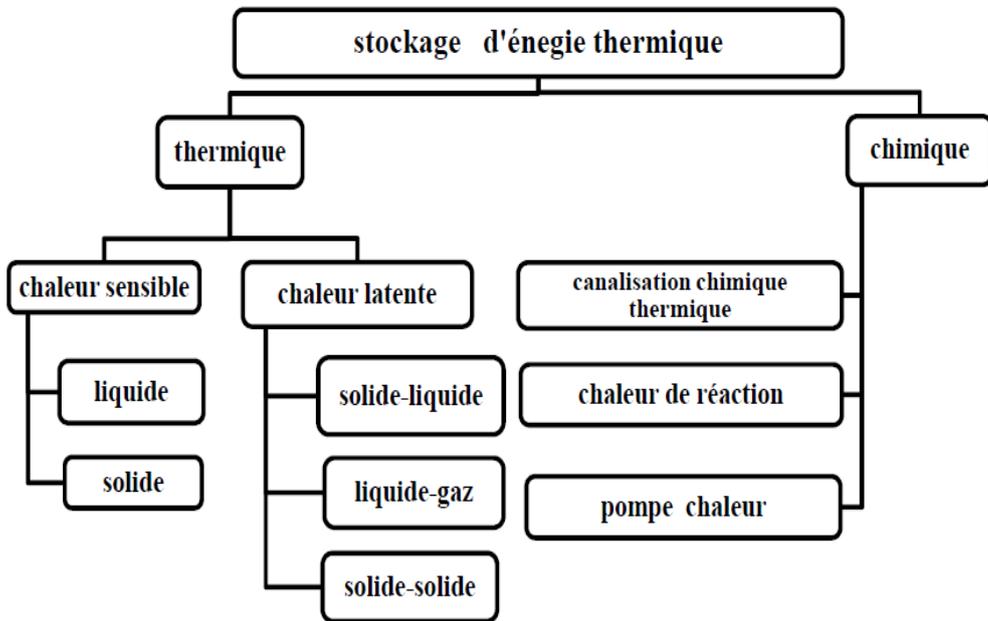
شبكات الحرارة والبرودة و محطات الطاقة الشمسية، الأعمال الزراعية، والإسكان، والإلكترونيات ... الخ

كما يمكن إحصاء بعض إيجابيات تخزين الطاقة الحرارية في النقاط التالية :

- 1- عندما يكون فائض الانتاج قابل للتخزين فإن ذروة الاستهلاك تكون مضمونة لتفريغ الطاقة المخزنة .
- 2- إدماج الطاقة المتجددة يكون سهل خاصة في حالة الحرارة الشمسية التي تصادف الإختلاف الليل والنهار والإختلاف بين الفصول حيث تسمح أنظمة التخزين بتنظيمها و التقليل من هذا المشكل .
- 3- تثمين الطاقة الضائعة وهي الطاقة غير المستعملة أثناء الإجراء او بعد الانتهاء منه حيث ان الهدف هنا ليس الحصول على حرارة . فتنتعش المنشآت الصناعية لكون الحرارة المفقودة خلال مدة العملية تخزن و تستخدم لاحقا لغيرها من الإحتياجات مثل : بعض العمليات الصناعية كحرق الفضلات المنزلية و تبريد مركز المعطيات .
- 4- أنظمة تخزين الطاقة تسمح بالتقليل من مشكل عدم إنسجام و توفر الطاقة في الوقت المناسب لإستعمالها وطلبها
- 5- ضمان القدرة على توفير الطاقة في حالات الاستهلاك الأقصى وفي حالة الصيانة
- 6- المساعدة على معالجة إزدحام شبكة الحرارة فهذه الاخيرة وحب تطويرها بصفة مستمرة لان بعض القنوات قد تصبح غير كافية لمرور الطاقة فالتخزين الحراري يسمح بالتخلص من هذا الإحتقان .
- 7- يمكن التزاج بين تخزين الطاقة الحرارية و مراكز توليد الطاقة لإستغلال الطاقة المحولة نهارا بتخزينها ومن ثم تفريغها ليلا (تخزين اليومي) و بالمثل تستغل الطاقة المحولة صيفا لتخزن وتفرغ شتاء (تخزين موسمي) .
- 8- ربح الطاقة بإسترجاع و تثمين الطاقة الضائعة وهذا بتحسين المردود .
- 9- إمكانية إختيار مصدر الطاقة المراد استعمالها حسب سعرها . [9]

III. 4. أنظمة تخزين الطاقة الحرارية :

نحاول خلال هذا الفصل التعريف بأنظمة تخزين الطاقة الحرارية حيث أن الطاقة الحرارية هي مجموع الطاقة الكامنة والحركية للذرات والجزيئات التي تشكل المادة . فبعد هذه الإهتزازات الذرية والجزيئية تتكون الطاقة الحرارية في المواد . وهكذا، فإن الطاقة الحرارية يمكن تخزينها على أنها تغيير في الطاقة الداخلية للمادة على شكل حرارة محسوسة او حرارة كامنة او حرارو كيميائية ، أو مزيج من هذه الأنظمة . [9] (الشكل 3.III) يظهر لمحة عامة عن تقنيات تخزين الطاقة الحرارية الرئيسية ليتم التفصيل فيها خلال هذا الفصل .



الشكل 3.III. مخطط يوضح تقنيات تخزين الطاقة الحرارية [9]

III. 1.4. تخزين الطاقة بالحرارة المحسوسة :

في تخزين الحرارة المحسوسة تتجمع الطاقة الحرارية و تخزن بإرتفاع درجة حرارة المادة المخزنة الصلبة أو السائلة بشرط عدم تغير في الحالة الفيزيائية او البنية الجزيئية لمواد التخزين ، حيث أن المادة تفقد او تخزن حرارة في مجال معين من درجة الحرارة ، فدورات التخزين وإستعادة الحرارة المتراكمة، يمكن أن تكرر عدة مرات بإستخدام نظام تخزين الحرارة المحسوسة دون أي مشاكل. وهذه هي أهم ميزة لهذه الطريقة . ومع ذلك، فإن إشتراط وجود حجم كبير من وسائل التخزين يمكن إعتبره كعيب في هذا النظام . فكمية الحرارة المخزنة في هذا النظام تعتمد على :

- السعة الحرارية لوسيلة التخزين

- التغير في درجة حرارة

- كتلة مواد التخزين .

بحيث اذا كان ضغط ثابت وقمنا بتسخين جسم صلب او سائل ذو كتلة m وسعة حرارية كتلية $C(T)$ من درجة حرارة ابتدائية T_1 إلى درجة حرارة نهائية T_2 . كمية الطاقة المخزنة في هذه الحالة تعطى بالعلاقة التالية :

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m C_p dT \quad (1- III)$$

Q : كمية الحرارة المخزنة (J) . C_p : الحرارة النوعية الخاصة بمادة التخزين (J/ kg K) .

m : كتلة مادة التخزين (kg) . dT : التغير في درجة الحرارة أثناء عملية التخزين

وباعتبار ان الحرارة النوعية ثابتة في مجال درجات الحرارة بين T_1 و T_2 : $C(T) = C$) ومنه :

$$Q = m C_p (T_2 - T_1) \quad (2- III)$$

من الملاحظ أن كمية الطاقة المخزنة تتناسب مع الفرق في درجة الحرارة، اذا فهذا النوع من التخزين يكون مهم ومعتبر فقط عند

الفروق الكبيرة في درجة الحرارة . و نميز الحالتين التاليتين:

• اذا كان : $T_2 > T_1$ في هذه الحالة نتكلم عن التخزين الساخن .

• اذا كان : $T_2 < T_1$ في هذه الحالة نتكلم عن التخزين البارد .

كما يمكننا تصنيف وسائل تخزين الحرارة المحسوسة على النحو التالي :

- وسائل تخزين بإستعمال مواد سائلة : مثل الماء و الأملاح المنصهرة .

- وسائل تخزين بإستعمال مواد صلبة : مثل الصخور و المعادن . [8-9-10]

III. 1.1.4. تخزين الحرارة المحسوسة مع المواد السائلة :

✓ **تخزين الماء** : يعتبر الماء أفضل وسيط للتخزين في درجات الحرارة المنخفضة ، وهذا يرجع للسعة الحرارية الكبيرة التي تميزه

مقارنة مع الاجسام الاخرى (4185 J/ kg K عند 20°C) وهكذا فالماء يستطيع تخزين حوالي : 250 kJ/ kg

عند تغير الحرارة بـ 60°C . إضافة الى أن الماء غير مكلف وهو موجود بكثرة ويمكن الحصول عليه بسهولة .

لكن ارتفاع ضغط بخاره بالنسبة للتطبيقات في درجة الحرارة عالية يستوجب عملية عزل الماء وهو مكلف ، فالخزان يجب أن يقاوم الضغوط العالية . كما أن الماء لا يعتبر فقط كوسيط لتخزين لكن يستعمل كوسيط لنقل الطاقة .
حاليا الماء الساخن هو الوسيلة الأكثر استخدام في أنظمة تطبيقات الطاقة الشمسية ، وهي مستعملة في درجة حرارة تتراوح بين (25°C– 90°C) .

- كما توجد وسائل أخرى لتخزين المياه مثل : المياه الجوفية الطبيعية تحت الأرض والخزان . [10]

✓ تخزين عن طريق سوائل أخرى :

السوائل الأخرى التي تستعمل في تخزين الحرارة عن طريق الحرارة الحساسة هي عموما:

زيوت عضوية و أملاح معدنية ذائبة . وتكون عموما سعتها الحرارة من 25% الى 40 % مقارنة بسعة الماء فنجد :

- زيوت عضوية : لديها ضغط بخار أضعف من الماء كما يمكن استعمالها في درجات حرارة عليا أكثر من 300°C لكن أقل من 350°C لتجنب تفككها .

- أملاح معدنية ذائبة : يعتبر هيدروكسيد الصوديوم هو الأكثر استعمالا لديه درجة انصهار قيمتها 320°C ومن الممكن

إستعمالة في درجة أكبر من 800°C لكنه يسبب تآكل ويصعب تخزينه في درجة حرارة عالية . [10]

III. 2.1.4. تخزين الحرارة المحسوسة مع المواد الصلبة :

على عكس تخزين السائل فإن تخزين في المواد الصلبة يمكن أن يستعمل في التطبيقات عالية أو منخفضة الحرارة دون وجود

مشكل الضغط المطروحة في حالة الماء ، كما تجنبنا مشاكل أخرى تسببها بعض السوائل مثل : التآكل و الإستقرار والأمن .

يوجد تنوع كبير في مواد الصلبة المستعملة فنجد مثلا : مادة حديد الزهر (la fonte) هي المادة الأكثر ملائمة نظرا لكثافة

تخزينها التي تتعدى الماء . لكن هذه المادة تبقى مكلفة مقارنة بالمواد الأخرى مثل : الخرسانة - الطوب - الحجر - الرمل -

بالنسبة لتطبيقات الشمسية نجد الخرسانة و الحجر هي الأكثر إستعمال في مجال السكن .

وهذا التخزين يستعمل عند درجة حرارة أكبر من 100°C بالتعاون مع تدفئة الهواء بالطاقة الشمسية علما أن الحصى يمكن

أن يستعمل في درجة حرارة تفوق حتى 1000°C . من أكثر المواد المستعملة في تخزين الحرارة الحساسة عند الدرجة 20°C

نجد : الطين والطوب والحجر الرملي و الخشب و الخرسانة و الزجاج و الألمنيوم و الحديد والنحاس . [8]

III. 4. 3.1 حلول تكنولوجيا التخزين بالحرارة الحساسة:

المبدأ	التقنية
الطاقة الحرارية تنتقل عن طريق سائل تبريد في وسط صلب	التخزين غير نشط في وسط صلب
حاوية لتخزين السائل الخارج من محطة الطاقة الشمسية والتي تغذى في فترة عدم توفر أشعة الشمس بمولد البخار. بعد الخروج منها، يبرد السائل، ويوجه إلى خزان آخر للتخزين قبل أن تعود مرة أخرى إلى المحطة الشمسية .	تخزين نشط بخزائين
في هذا النوع من التخزين يستخدم سائل واحد فقط وخزان واحد . السائل الساخن والبارد موجودة في الخزان نفسه، مع تدرج حراري بينهما . السائل المستخدم في الخزان هو سائل نقل الحرارة	تخزين نشط في خزان
يتم تخزين البخار المسخن في خزان ماء تحت ضغط بحيث يتكثف. في مرحلة التفريغ، ينتج البخار عن طريق التوسع في الماء المشبع	التخزين بالبخار

الجدول 1.III. جدول يوضح الحلول التكنولوجية لتخزين بالحرارة الحساسة [11]

III. 4. 2. تخزين الطاقة بالحرارة الكامنة :

III. 1.2.4. مفهوم التخزين بالحرارة الكامنة :

الحرارة الكامنة وكما سبق تعريفها هي كمية الحرارة اللازمة لتحويل المادة من حالة إلى أخرى لكل واحد كيلو جرام من المادة، وتعتبر من الخصائص المميزة للمادة، فخلال مرحلة تغير الحالة للمواد من الصلبة إلى السائلة أو من السائلة إلى الغازية يمكن أن تخزن الطاقة الحرارية بدون تغير في درجة حرارتها بطريقة إيزوتارم ، فعند حدوث التحول لا بد من تزويد المادة بحرارة من الخارج . ولهذا يعتبر هذا النوع من العمليات الماصة للحرار وبالعكس . وتدعى المواد المستعملة في هذا النوع بالمواد المتغيرة الطور MCP فسرعة جزيئات هذه المواد لا تزداد بالحرارة المقدمة خلال عملية الإنصهار ، وإنما تزداد بزيادة الطاقة الكامنة الخاصة. وهذا هو السبب في ثبوت درجة حرارة طوال عملية التحول، وهي درجة حرارة المرحلة الانتقالية .

تعطى كمية الحرارة المخزنة بالعلاقة التالية:

(3 – III)

$$Q = m(h_f - h_i) = m\Delta h_f \text{ (J)}$$

إذا كانت T_f هي درجة حرارة تغير الطور لمادة نقية و الذي تتغير درجة حرارته من T_1 الى T_2 ، حيث :

$T_1 \leq T_f \leq T_2$ فإن الطاقة المخزنة خلال هذا التحول تعطى بالعلاقة التالية والتي تمثل حدين هما الحرارة المحسوسة و الحرارة

الكامنة للكتلة m :

$$(4 - III) \quad Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_s dT + m L + \int_{T_i}^{T_f} m C_L dT \quad (J)$$

الحرارة المخزنة (Q) = الحرارة المحسوسة الصلبة + الحرارة الكامنة + الحرارة المحسوسة السائلة

$C_s (T)$: الحرارة النوعية لجسم في حالة صلبة.

$C_L (T)$: الحرارة النوعية لجسم في حالة سائلة.

L : الحرارة الكامنة لتغيير الطور.

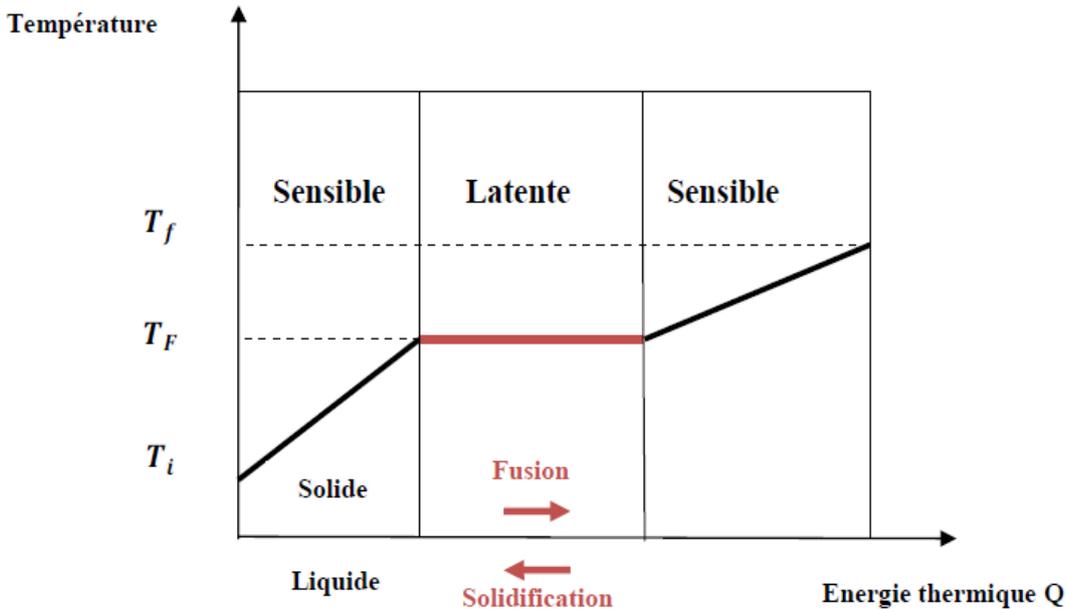
في حالة استعمال مادة نقية يكون منحنى التغير في درجات الحرارة مماثل لما هو موضح في (الشكل 4.III).

خلال تسخين المادة وقبل الوصول الى درجة حرارة انصهارها، نلاحظ ان منحنى تغير درجة الحرارة مع الزمن يكون خطي ، بينما

خلال التغير في الحالة تبقى درجة الحرارة ثابتة.

إذا أتينا الى تغير الانتالبي النوعي بدلالة درجة الحرارة فسنحصل على المنحنى التالي فمن الملاحظ ان الانقطاع يسببه تغير الحالة

(وليس لتغير في درجة الحرارة) [8]

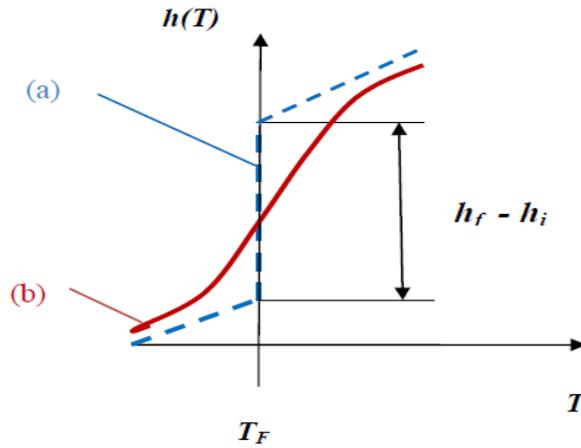


الشكل 4.III منحنى يوضح الخطوات المختلفة خلال تخزين الحرارة الكامنة (الصلبة / السائلة) [10]

لذلك نلاحظ ما يلي:

- 1 - الحرارة الكامنة أكبر بكثير من حرارة محسوسة (للفجوة درجة الحرارة ليست مهمة جدا).
- 2 - تعتمد نقطة الانصهار على المواد المستخدمة؛ يسمح هذا المعيار باستخدام مواد مختلفة تبعاً لدرجات الحرارة المطلوبة. هذه المواد هي: (MCP)

في حالة وجود خليط (سبيكة، ...)، منحنى تغير الانتالي لا يوجد فيه انقطاع منحنى (b) [8] إلا في الحالة التي يكون فيها تشكيل مكون معروف وفي حالة انصهار أو تجمد منسجم. (الشكل 5.III)



الشكل 5.III: الاختلاف في المحتوى الحراري محدد على أساس درجة حرارة (a) لمادة نقية (b) إلى الخليط [8]

III.2.2.4. المواد المتغيرة الطور MCP :

تدعى كل مادة قادرة على تغير حالتها الفيزيائية في مجال حرارة ضيق بالمادة متغيرة الطور يرمز لها بـ MCP (Phase Change Materials) حيث ان هذا المجال ينحصر عموماً بين 10 C° و 80 C° وتبقى مرحلة تغير السائدة هي الانصهار / التصلب. درجات الحرارة هذه متوفرة طبيعياً وموجودة في كل مكان في حياتنا اليومية على سبيل المثال $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، حيث تحتوي على نقطة انصهار تقدر بـ 27 C° ، يمكن دمجها في هيكل المبنى لتخفيف التقلبات النهارية في درجة الحرارة المحيطة.

فمواد متغيرة الطور يمكن ان يكون في الأشكال التالية :

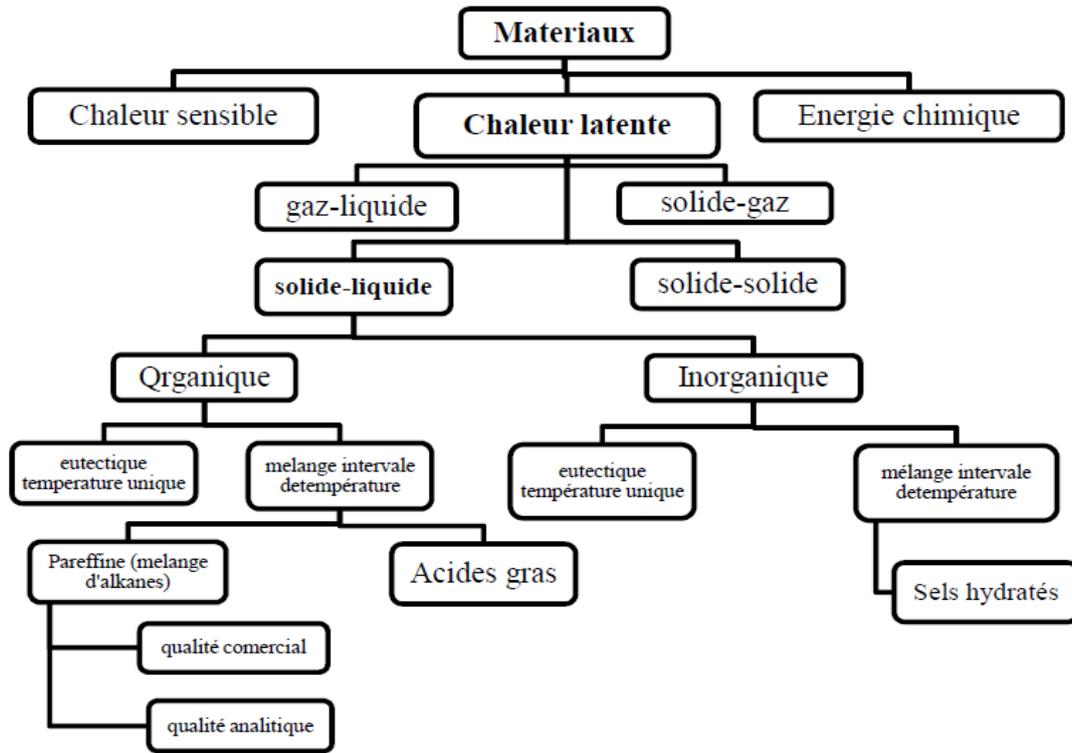
✓ صلب - صلب

✓ صلب - سائل

✓ صلب - غازي

✓ سائل - غاز أو العكس [10]

المخطط (الشكل 6.III) يوضح تصنيف مواد متغيرة الطور MCP :



الشكل 6.III مخطط يوضح تصنيف مواد متغيرة الطور MCP [8]

3.2.4.III إيجابيات وسلبيات أشكال متغيرة الطور

✓ في حالة تغير الطور سائل / غاز : يطرح هنا مشكل أساسي هو التخزين كونه يعتمد على درجة حرارة عالية من أجل تغير الحالة كما يلازمه تغير حجمي كبير مما يجعل التطبيقات غير عملية لأجل إحتواء مشكل الطور الغازي يمكن تخزينه بالإمتصاص (H₂O/Li Br) ، او (H₂O/zéolite, CO₂/ carbone activé) ، أو تفاعل (NH₃/ sels.) لديه بعض الفوائد الخاصة مثل : توظيف الحرارة المحيطة أما سلبياته فنجد أنه معقد وبه التسمميه وتآكل مع الحاوية والحاجة الى الفعالية الكبيرة للتبادل الحراري . [12]

✓ في حالة تغير الطور صلب / صلب : تتميز بإيجابية إمتصاص وإعطاء الحرارة مع عدم التحول الى سائل في الظروف العادية فهي تصبح صلبة أو قاسية نوعا ما . أما سلبياتها فنجد الحرارة الكامنة ضعيفة مع صعوبة إيجاد مستويات درجة حرارة لتغير الحالة متناسقة مع التطبيقات . ومن أهم المواد نجد المحاليل العضوية الصلبة التالية :

- ثريتول (T_f = 188°C ، الحرارة الكامنة للانصهار 323 kJ/ kg)
- Li₂SO₄ (T_f = 578°C ، الحرارة الكامنة للانصهار 214 kJ/ kg)

▪ KHF_2 ($T_f = 196^\circ\text{C}$ ، الحرارة الكامنة للانصهار $135\text{kJ}/\text{kg}$) [12]

✓ في حالة تغير الطور صلب / سائل : ينتج عن استعماله طاقة كامنة متوسطة كما انه لا يؤدي الى تغير حجمي لذلك التخزين فيه أسهل . إضافة الى ذلك لدينا خيار مهم في المواد المستعملة في التطبيقات حيث أن مستوى درجة الحرارة لتغير الحالة لها قيم متوافقة مع عدة تطبيقات [12].
الجدول التالي يقدم باختصار أهم ايجابيات وسلبيات مختلف متغيرات الحالة .

متغيرات الحالة	الايجابيات	السلبيات
- سائل / غاز	- قيمة كبيرة للحرارة الكامنة	- تغير كبير في الحجم
- صلب / صلب	- تغير طفيف في الحجم - لا يتكون السائل	- قيمة ضعيفة للحرارة الكامنة
- صلب / سائل	- تغير ضعيف في الحجم	- قيمة متوسطة للحرارة الكامنة

جدول III-2 جدول يعطي ايجابيات وسلبيات مختلف متغيرات الحالة [11] [12]

III.4.2.4. بعض الظواهر التي تؤثر على كفاءة التخزين :

✓ فرط البرودة : (La surfusion) : عند تبريد السائل لبعض المواد عموما لا يلاحظ تصلبه عند لحظة الوصول الى درجة حرارة إندماج المادة حيث يمكن ان تبقى في الحالة السائلة طيلة عشرات درجات حرارة تغير الحالة ، وعند بداية عملية التصلب تطرد الحرارة واذا كان السائل كبيرا نوعا ما وكان التبادل مع الخارج ضعيف فإن بداية التصلب تسبب ارتفاع في درجة حرارة المادة الى غاية الوصول الى درجة حرارة تغير الطور . هذه الظاهرة تقلل من الفعالية الحرارية لوحدة التخزين عن طريق الحرارة الكامنة بالمقارنة مع تخزين بالحرارة الحساسة ، في الحقيقة فقدان الحرارة اثناء التصلب تكون في درجات حرارة دنيا اقل من تلك المتعلقة ببداية التخزين اذا لدينا فرق بين الحرارة الممتصة اثناء التخزين وتلك المسترجعة اثناء التبريد . حيث لا نجد هذا المشكل الا عند البعض من مواد MCP مثل مواد غير العضوية (أملاح مائية) .

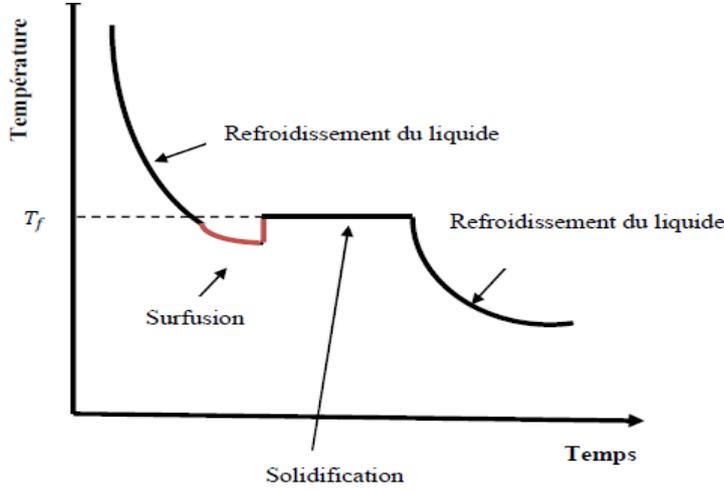
أما عن الحلول المقترحة فنجد :

- إدراج مواد إضافية نشطة على سطح .

- تسهيل تنويته (la nucleation) بواسطة بلورات صلبة ثابتة او مستقرة حول درجة حرارة التبلور .

- نحافظ على منطقة باردة داخل المادة .

ففرط التبريد يمنع استعمال الحرارة الكامنة لتغير الطور عند درجة الحرارة المرغوب فيها . و قد يكون فرط التبريد إيجابيا لبعض التطبيقات مثلا في التخزين لمدة طويلة فهذه الظاهرة تسمح بتخزين MCP عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة انصهار جسم صلب . [10،11]



الشكل III -7 منحنى يوضح ظاهرة فرط البرودة [11]

✓ **فرط التسخين (La surchauffe)** : فرط التسخين لجسم معين هو الإستمرار في تسخينه بعد تغير حالته اي حتى بعد إنصهاره او بعد تبخره . فإذا كان الفرط في التسخين في مدة زمنية قصيرة فالحرارة المخزنة في النظام تعتبر حساسة وإذا كان فرط التسخين في مدة طويلة فتخزين الحرارة هنا بالحرارة الكامنة يفقد أهم إيجابياته مقارنة بالحرارة الحساسة . [10،11]

✓ **التمدد (La dilatation)** : أثناء تغير الطور من الصلب الى السائل المادة تغير من كثافتها وبالتالي يتغير حجمها وهنا يطرح مشكل التخزين في بعض التطبيقات خاصة التي يستعمل فيها حاويات مغلقة أين يتطلب الأمر زيادة تحمل في الضغط . [11]

✓ **التآكل (La corrosion)** : نقص الإستقرار على المدى الطويل لنظام حاوية ال MCP كثيرا ما قللت من توسع إستخدام التخزين بالحرارة الكامنة ويمكن إختصار أسباب هذه الضاهرة في عاملين هما :

نقص الإستقرار الكيميائي للمادة في حد ذاتها أو التآكل بين المادة MCP ومادة صنع الحاوية وبهذا الخصوص يعتبر البيرافين مناسب للمحافظة على خصائصه الكيميائية خلال أطوار الشحن والتفريغ .

وفي المقابل الطبيعة الأيونية للأملاح المائية تسبب مشكلة التآكل مع الحاويات المعدنية. [11]

✓ **فصل المرحلة (La corrosion):** الكثافة العالية لتخزين أملاح المائية تنقص عموماً مع عدد الدورات بسبب فصل

مراحل الأطوار هذه الظاهرة مرتبطة بتكوين متبادل لالهيدرات H_2O (n-1) أثناء إنصهار المركب n مرة الهيدرات H_2O n

يجعل السيورة غير قابلة للانعكاس وتأثر سلبي على فاعلية النظام ، يمكن التغلب على المشكل بإضافة مادة لل MCP تمنع

سقوط الطور الأكثر كثافة في عمق الحاوية أو بدائلها ويجعل MCP أكثر لزوجة هناك تجارب على صوديوم الثلاثي المائي

($NaCH_3COO.3H_2O$) بينت أن إضافة الطين (20% من الكتلة) مثلاً تسمح بتجنب هذه السلسلة . [11]

III. 5.2.4. إختيار MCP

لتسهيل إختيار MCP بالنسبة لتطبيق معين نأخذ بعين الاعتبار بعض المعايير أهمها :

✓ اعتبارات حرارية

✓ الخصائص الفيزيائية

✓ الاعتبارات الحركية

✓ اعتبارات الكيميائية

✓ اعتبارات إقتصادية

سوف نأخذ بالتفصيل في الفصل التالي . [10]

III. 6.2.4. أكثرالمواد متغيرة الطور إستخداماً

يمكن تصنيف مواد متغيرة الطور MCP عادة في ثلاث فئات:

✓ المواد غير العضوية: هيدرات الملح والأملاح والمعادن والسبائك.

✓ المواد العضوية: البارافين، البارافين اجسام غير البارافينية .

✓ المواد سهلة الإنصهار (Eutectic) : الأجسام غير العضوية أو / و العضوية.

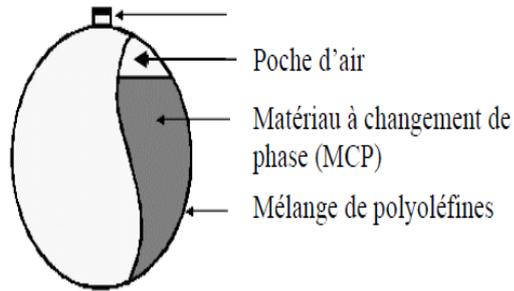
سوف نتطرق بالتفصيل لهذه المواد في الفصل التالي .

III. 7.2.4. تقنيات لتكييف مواد تغيير الطور MCP

تكييف الـ MCP يقوم على عدة مبادئ للتوافق بين مادة الخزان (الحاوية) و مواد تغيير الطور MCP ، فعندما تصبح الـ MCP سائلة وبسبب لزوجتها الضعيفة نسبة التسرب تزداد بقوة فنجد اشكال مع حاوية التخزين ، في الأخير يمكن القول أن تغيير الطور يسبب تغير في الحجم ممكن أن يؤدي الى كسر الحاوية إذا كانت هذه الاخيرة لا تستطيع إستيعاب هذا التغير . يوجد عدة تقنيات لتكييف مواد تغير الطور منها :

III. 1.7.2.4. تغليف الكلي (Macro encapsulation) :

هي آلية تكون فيها مادة تغيير الطور مغلقة على شكل (انابيب - كريات - أكياس - أسطوانات - ألواح) ، (الشكل 9.III) هناك عمليات صناعية تستعمل عقيدات تأخذ ثلاث أقطار (98 - 78-77) mm تستعمل على حسب درجات حرارة تحول مادة الـ MCP (الصورة 8.III) ، يطرح هنا مشكل ضعف التوصيلية لمادة تغير الطور فيحد من التحويلات . إضافة الى أنه يجب الإنتباه لإمكانية إنفصال قد يقع بين الـ MCP وغلافها والذي يمكن ان يضر بعد عدة دورات من الإنصهار والتصلب . وفي بعض الحالات التحول الحراري والتسربات تسبب مشكل . [8،10،11]



الشكل 9.III. تكييف الـ MCP في عقيدات [11]

الشكل 8.III. أشكال مختلفة من التغليف الكلي [11]

III. 2.7.2.4. تغليف صغير (Micro encapsulation)

هي مجموعة تقنيات تسمح بالحصول على جسيمات من حجم 10nm إلى 1000µm تأخذ عدة أشكال مثل (كريات - أسطوانات صغيرة عمودية) تحتوي على مادة MCP في حويصلات مغلقة ويمكن إستخدامها بعد ذلك في نظام تخزين الطاقة الكامنة التي يتم تطبيقها في مجموعات؛ يتم تخزين الطاقة بتمرير المائع في الناقل (الهواء أو الماء) الشكل (III. 11) خلال هذه الكتلة. وميزة هذه الهندسة الداخلية في مجموعات من MCP المغلف هو أنه يوفر سطح التبادل

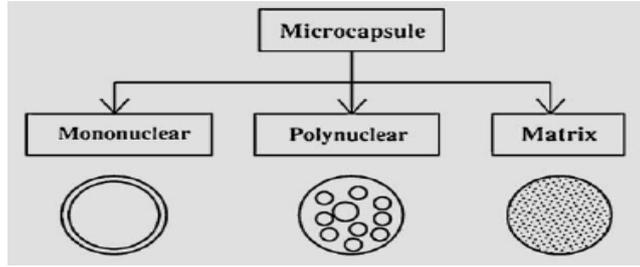
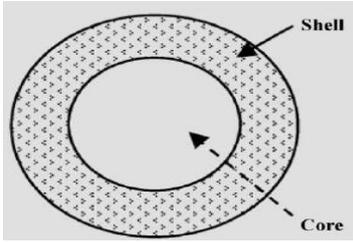
كبيرة (مساحة كروية)

تقنية ميكروكبسولي ل MCP تتم عن طريق :

- إضافة الغرافيت

- إضافة (SiC) سيليكون كاربيد

- دهن كرية نحاس تحتوي على ال MCP بشرط من مادة النيكل [8،10،11]



الشكل. III.11 وصف للتغليف الصغير [10]

الشكل. III.10 مختلف أنواع التغليف الصغير [10]

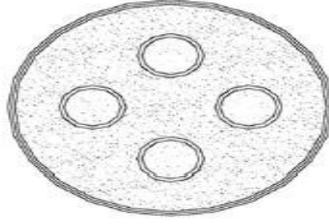
III. 3.7.2.4. دمج بنيات معدنية مع MCP

هذه الطريقة تستعمل بنيات معدنية على شكل اسطواني أو كروي من الفولاذ (الشكل. III.12) أعطت هذه الطريقة

الإيجابيات التالية :

-تحسين توصيلية الحرارةية لل MCP .

-تحفيظ وقت الانصهار / التصلب . [10]



الشكل. 12.III. تمثيل مختلف انواع ادماج ال MCP عن طريق بنيات معدنية [10]

4.7.5.4.III توزيع المواد ذات توصيلية عالية في MCP

في هذه الطريقة تضاف جسيمات معدنية مثل: النحاس - الألمنيوم - ... في MCP من أجل تحسين توصيلية هذه المواد وزيادة كمية الطاقة المخزنة [10]

8.2.4.III. تطبيقات ال MCP

1.8.2.4.III. تطبيقات مواد ال MCP في الصناعة

- ✓ التكييف: يستعمل في البنوك و المستشفيات و المكاتب
- ✓ إجراءات (العمليات) : مصانع الحليب والجبن .
- ✓ الحماية : قاعات المراقبة والأعلام الالي . [12]

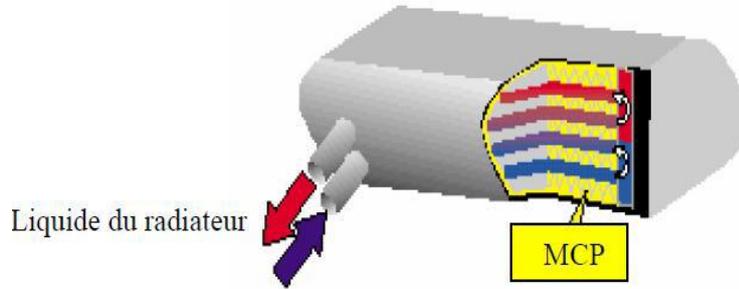
2.8.2.4.III. تطبيقات مواد ال MCP في تبريد حراروكيميائي

استعمال التبريد الحراروكيميائي مع ال MCP المغلفة والمدججة مع صمام حراري (vavlv thermostatique) هذا النظام يوظف بإستعمال طاقات متجددة خاصة بالطاقة الشمسية الضوئية المعنية بتوليد الكهرباء على شكل تيار مستمر كما أن هذا النوع من التبريد لديه مجال تطبيق واسع في تخزين الاغذية والأدوية ، إذا كان استعمال MCP يطور او يحسن بشكل واضح نسبة الأداء فإن إضافة الصمام الحراري ليس ضروري [12]

3.8.2.4.III. تطبيقات مواد ال MCP في محركات ذات الاحتراق الداخلي

إستعمال الطاقة الكامنة من أجل تسخين المحركات ذات الاحتراق الداخلي مثل محركات الديزل قبل التشغيل حيث يعمل النظام على طرد الحرارة أثناء تغير حالة ال MCP من السائل الى الصلب ، مما يساعد على تجنب الكثير من السلبيات التي تسبب فيها تشغيل المحركات وهي باردة . مثل زيادة استهلاك والوقود وزيادة تركيز الغازات المنبعثة ل CO_2 غازات C_nH_n .

فإن MCP يعمل مثل بطارية التخزين لحرارة الكامنة هذه البطارية متصلة بمبرد حيث تخزن حرارة إضافية عندما يدور المحرك في درجة حرارة عمله أو وظيفته (الشكل III.13) هذه الحرارة نافعة لبداية تشغيل المبرد للمحرك أو حتى أثناء البرودة في الاشتغال فهي تفيد الإحماء السريع. [12]



الشكل III.13 البطارية الحرارية

III.4.8.2.4 تطبيقات الـ MCP في بطارية أيون الليثيوم

تستعمل MCP هنا من أجل المحافظة على ثبات درجة الحرارة في البطاريات دون إستعمال مكونات التبريد النشطة مثل المروحية نجدها تستعمل في السكوتر الكهربائي (الشكل III-14) لهذا التطبيق ايجابيات هي انها مضغوطة و وزنها خفيف - بطارية أيون الليثيوم الجديدة تحتوي على 18650 خلية Li-ion محاطة بـ MCP مع فتحة درجة الحرارة بين

(41°C و 44°C) شكل جديد للتبريد الحراري [10]



الصورة III-14 سكوتر كهربائي [10]

III.5.8.2.4. تطبيقات الـ MCP في تبريد الكترولني :

نجد العديد من البحوث الحديثة العلمية مهمة بإستعمال الـ MCP في الأنظمة الإلكترونية وهي في تزايد مستمر نظرا لزيادة الحاجة للطاقة ولحاولة تصغير الأجهزة قدر الإمكان فكان التركيز أكثر على ملائمة حرارة الأجهزة الإلكترونية ، وإستعمال التقنية غير النشطة في التبريد يعطي إيجابية الصيانة . كما نجد في بعض التطبيقات الخاصة بتكييف قطع حاويات أو علب تحتوي على أجهزة الكترولنية [13] .

III.6.8.2.4. تطبيقات الـ MCP في المباني :

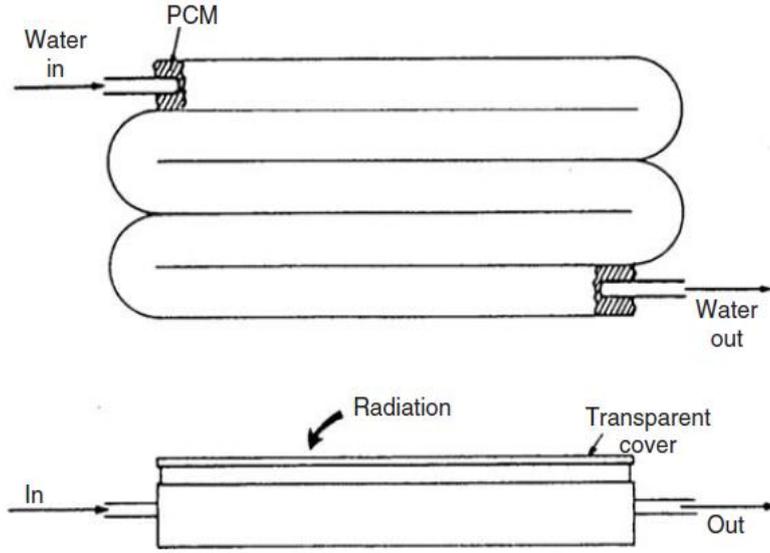
تعتبر الراحة الحرارية هي إحدى حاجات البديهية اللازمة في كل المنشآت المبنية حيث يجب تزويدها بأنظمة تسمح بتدفئة أو تبريد الجو الداخلي من بين المواد المستعملة هي الـ MCP فعندما تزداد درجة الحرارة الخارجية أو يزداد نشاط السكان فإن الـ MCP تتدخل بتغيير حالتها للحفاظ على الراحة والتوازن الحراري حيث تطرح أربع طرق إقتصادية لتكييف الـ MCP في المباني هي:

- دمج مباشر لـ MCP في خليط رطب لمواد المبني .
- دمج مباشر عن طريق إمتصاص الـ MCP الذائب أو المنصهر في مواد البناء .
- دمج مباشر لـ MCP عن طريق الكبسلة .
- دمج الـ MCP في مواد التغليف أو التلبس وهو الأكثر إستعمالا لأن مساحة التبادل كبيرة [10،12]

III.7.8.2.4. تطبيقات الـ MCP في التخزين الشمسي الحراري

المشكلة الرئيسية المرتبطة بإستعمال الطاقة الشمسية الحرارية تتعلق بالتخزين فإنتاج الماء الصحي الساخن عن طريق تنقل الماء عبر الواح شمسية مرتبط مباشرة بوجود الشمس هذه الطاقة يمكن الحصول عليها حتى أثناء عدم الحاجة إليها حيث تستعمل الـ MCP بتخزين هذه الطاقة بالحرارة الكامنة يسمح بتجاوز هذه المشكلة جزئيا . فكمية الطاقة المخزنة في بالون من نفس الحجم تكون أكبر بإستعمال الـ MCP من إستخدام الماء فقط . وكمثال على ذلك نجد تطبيق سوكولوف وكيزمان (1991) للـ MCP لتسخين المياه . يحتوي النظام على أنبوب شمسي يتكون من أنبوبين متحدتين المركز مع المسافة بينهما مليئة بـ MCP (الشكل III.15) . يتم إمتصاص الإشعاع الشمسي مباشرة على السطح الخارجي وبعد ذلك تنتقل الى الـ MCP حيث يتم تخزينها كحرارة حساسة وكامنة . البناء بسيطة . ولهذا النظام مزايا تشمل :

- الحرارة الكامنة كبيرة.
- التخلص من المكونات المكلفة مثل خزان المياه والمضخة وأجهزة التحكم.
- ملائمة النظام لبناء وحدات وتركيب.
- الحماية من التجمد. [10-1]



الشكل . III.15 أنبوب TSA الشمسية باستخدام MCP [1]

III.3.4. التخزين الحراروكيميائي:

الطاقة الحراروكيميائية هي الحرارة الممتصة أو المحررة أثناء حدوث تفاعل كيميائي ماص للحرارة أو ناشر للحرارة. ويعتمد تخزين الطاقة الحراروكيميائية على طاقة الروابط الكيميائية خلال تفاعل كيميائي عكوس. في هذا النظام سعة تخزين الحرارة مرتفعة عموماً لأن الطاقة الكيميائية تكون مرتفعة عند كسر الروابط الكيميائية وإعادة تركيبها في تفاعل كيميائي عكوس.

ويعتبر هذا النظام أكثر تعقيداً من التخزين المحسوس والكامن. كما يجب في هذا النظام ان تكون المركبات الكيميائية المستخدمة تكون غير ضارة وغير قابلة للتآكل و يعتمد هذا النظام على الطاقة الممتصة وتحريرها في بداية الشوط الثاني وإصلاح العلاقات الجزئية عكسها تماماً التفاعل الكيميائي. في هذه الحالة، تعتمد على الحرارة المخزنة على كمية من تخزين المواد والحرارة رد فعل ماص

للحرارة ومنطقة التحويل. [1]. تعطى حرارة التخزين الحراروكيميائي بالعلاقة التالية :

(5 - III)

$$E = \sum_{i=1}^N \int_{T_i}^{T_f} m_i C_{pi} dT + n_A \Delta H_n$$

E : كمية الطاقة المخزنة (J)

m : كتلة المادة المتفاعلة (kg)

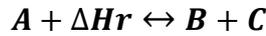
n_A : عدد المولات (mol) للمركب الكيميائي (A)

ΔH_n : أنتالبي التفاعل ($J \cdot mol^{-1}$).

مصطلح تخزين حراروكيميائي يغطي ظاهرتين: الإمتصاص والتفاعل الكيميائي. التخزين الحراري بالامتصاص يناسب تخزين في درجات الحرارة المنخفضة ($T \approx 80^\circ C$)، في حين تطبيقات مراكز الطاقة الشمسية ($T \approx 200-1000^\circ C$)، هنا تفاعلات تركيبات كيميائية تبدو الأكثر ملاءمة. التخزين الحراروكيميائي يستغل حالة الإنعكاسية في التفاعلات الكيميائية لتخزين الطاقة. بشكل عام، فالتفاعلات تحدث بالنموذج التالي:

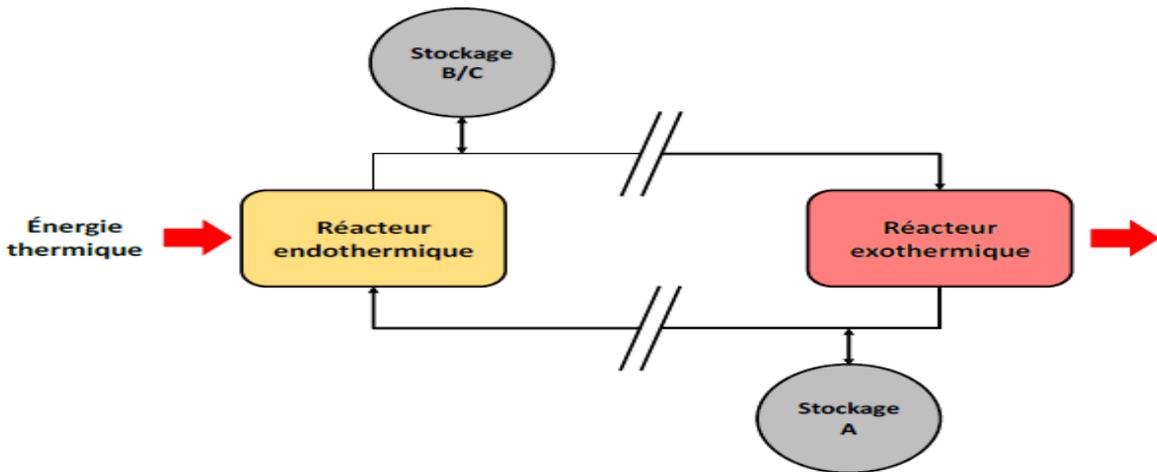


التفاعلات الأكثر شيوعا التي نواجهها هي من الشكل التالي:



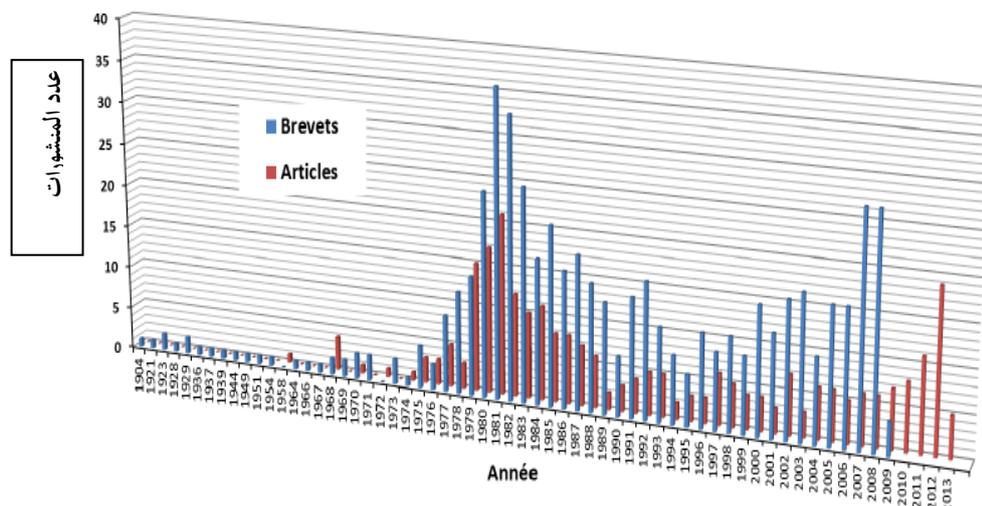
هذا النوع من التخزين، يجب أن يكون التفاعلات انعكاسية تماما حتى لا تفقد العملية قدرة التخزين خلال دورات. يظهر الرسم

البياني (الشكل 16.III) مبدأ تخزين حراروكيميائي . [9]



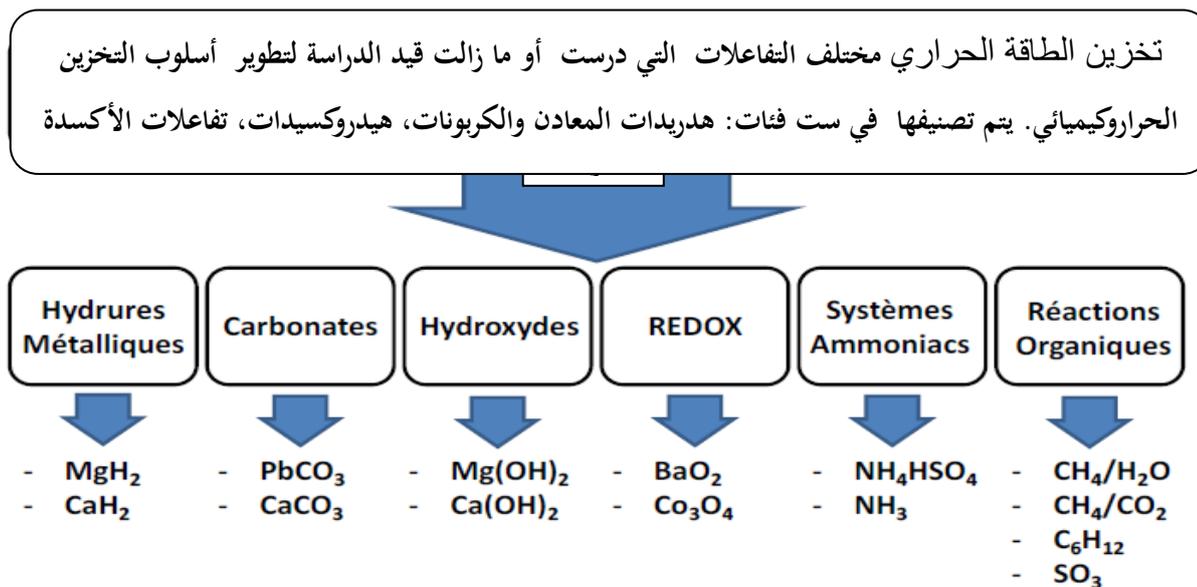
الشكل 16.III. مخطط يوضح مبدأ التخزين الحراروكيميائي [9]

من أجل مراقبة تطور تخزين حراروكيميائي من خلال أوائل القرن 20 إلى اليوم، تم تعيين التطور الزمني لعدد من المقالات المنشورة وبراءات الاختراع . [22]



الصورة III.17. التطور الزمني المقالات لنشر وبراءات الاختراع على التخزين الحراروكيميائي . [22]

مختلف التفاعلات التي درست أو ما زالت قيد الدراسة لتطوير أسلوب التخزين الحراروكيميائي. يتم تصنيفها في ست فئات: هيدريدات المعادن والكربونات، هيدروكسيدات، تفاعلات الأكسدة والاختزال، وأنظمة الأمونياك والتفاعلات العضوية بشكل موجز في (الشكل III. 18):



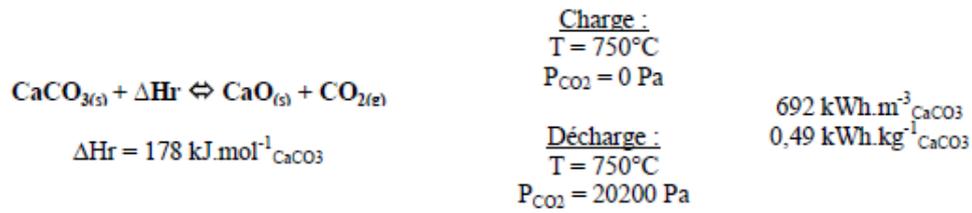
الشكل III.18. : تصنيف التفاعلات المعمول بها [22]

1.3.4.III بعض التفاعلات الكيميائية الإنعكاسية

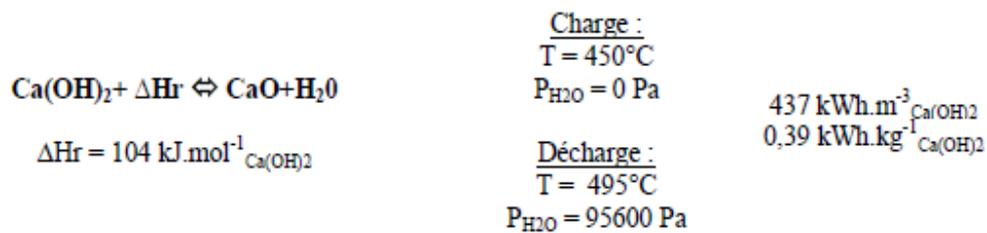
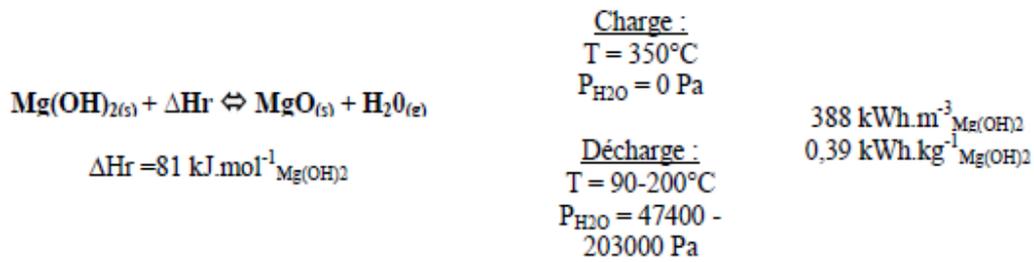
نلخص فيما يلي بعض البيانات من اجل تخزين الطاقة الحرارية في ارتفاع درجة الحرارة بواسطة التفاعلات الكيميائية

الانعكاسية [5]

REACTION	CONDITIONS OPERATOIRES DE CYCLAGE TESTEES	DENSITE ENERGETIQU
الهيدريدات		
$\text{MgH}_{2(s)} + \Delta\text{Hr} \Leftrightarrow \text{Mg}_{(s)} + \text{H}_{2(g)}$ $\Delta\text{Hr} = 75 \text{ kJ.mol}^{-1}_{\text{MgH}_2}$	<p><u>Charge:</u> $T = 380^\circ\text{C}$ $P_{\text{H}_2} = 0,14 \text{ MPa}$</p> <p><u>Décharge :</u> $T = 230^\circ\text{C}$ $P_{\text{H}_2} = 0,44 \text{ MPa}$</p>	$580 \text{ kWh.m}^{-3}_{\text{MgH}_2}$ $0,80 \text{ kWh.kg}^{-1}_{\text{MgH}_2}$
الكربونات		
$\text{PbCO}_{3(s)} + \Delta\text{Hr} \Leftrightarrow \text{PbO}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$ $\Delta\text{Hr} = 88 \text{ kJ.mol}^{-1}_{\text{PbCO}_3}$	<p><u>Charge :</u> $T = 400^\circ\text{C}$ $P_{\text{CO}_2} = 101 \text{ Pa}$</p> <p><u>Décharge :</u> $T = 350^\circ\text{C}$ $P_{\text{CO}_2} = 101350 \text{ Pa}$</p>	$303 \text{ kWh.m}^{-3}_{\text{PbCO}_3}$ $0,09 \text{ kWh.kg}^{-1}_{\text{PbCO}_3}$

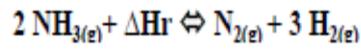


الهيدروكسيدات



الامونياك

S



$$\Delta \text{Hr}_{\text{Charge}} = 66,9 \text{ kJ.mol}^{-1}_{\text{NH}_3}$$

$$\Delta \text{Hr}_{\text{Décharge}} = 53 \text{ kJ.mol}^{-1}_{\text{NH}_3}$$

Charge :

$$T = 450^\circ\text{C}$$

$$P = 15 \text{ MPa}$$

$$745 \text{ kWh.m}^{-3}_{\text{NH}_3(l)}$$

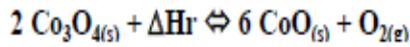
$$1,09 \text{ kWh.kg}^{-1}_{\text{NH}_3(l)}$$

Décharge :

$$T = 450^\circ\text{C};$$

$$P = 30 \text{ MPa}$$

الاكسيدات



$$\Delta \text{Hr} = 205 \text{ kJ.mol}^{-1}_{\text{Co}_3\text{O}_4}$$

Charge :

$$T = 850^\circ\text{C}$$

$$P_{\text{O}_2} = 0 \text{ Pa}$$

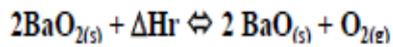
$$295 \text{ kWh.m}^{-3}_{\text{Co}_3\text{O}_4}$$

$$0,24 \text{ kWh.kg}^{-1}_{\text{Co}_3\text{O}_4}$$

Décharge :

$$T = 500\text{-}700^\circ\text{C}$$

$$P_{\text{O}_2} = 20200 \text{ Pa}$$



$$\Delta \text{Hr} = 77 \text{ kJ mol}^{-1}_{\text{BaO}_2}$$

Charge :

$$T = 850^\circ\text{C}$$

$$P_{\text{O}_2} = 0 \text{ Pa}$$

$$328 \text{ kWh.m}^{-3}_{\text{BaO}_2}$$

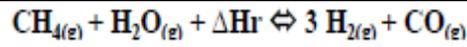
$$0,13 \text{ kWh.kg}^{-1}_{\text{BaO}_2}$$

Décharge :

$$T = 550^\circ\text{C}$$

$$P_{\text{O}_2} = 20200 \text{ Pa}$$

العضويات

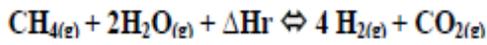


$$\Delta H_r = 206 \text{ kJ.mol}^{-1}_{\text{CH}_4}$$

Charge :
T = 850°C

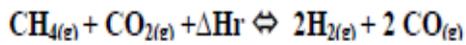
$$7,8 \text{ kWh.m}^{-3}_{\text{CH}_4(g)}$$

$$4,34 \text{ kWh.kg}^{-1}_{\text{CH}_4(g)}$$



$$\Delta H_r = 206 \text{ kJ.mol}^{-1}_{\text{CH}_4}$$

Décharge :
T = 400-700°C



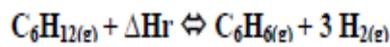
$$\Delta H_r = 247 \text{ kJ.mol}^{-1}_{\text{CH}_4}$$

Charge :
T = 700 – 850°C

$$7,7 \text{ kWh.m}^{-3}_{\text{CH}_4(g)}$$

$$4,28 \text{ kWh.kg}^{-1}_{\text{CH}_4(g)}$$

Décharge :
T = 400-700°C



$$\Delta H_r = 206,7 \text{ kJ.mol}^{-1}_{\text{C}_6\text{H}_{12}}$$

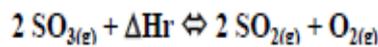
Charge :
T = 300°C
P = 0,1 MPa

$$530 \text{ kWh.m}^{-3}_{\text{C}_6\text{H}_{12(l)}}$$

$$0,68 \text{ kWh.kg}^{-1}_{\text{C}_6\text{H}_{12(l)}}$$

Décharge :
T = 340°C
P = 7 MPa

SO₃



$$\Delta H_r = 98 \text{ kJ.mol}^{-1}_{\text{SO}_3(g)}$$

Charge :
T = 800 – 1100°C
P = 0,1 – 0,5 MPa

$$646 \text{ kWh.m}^{-3}_{\text{SO}_3(l)}$$

$$0,34 \text{ kWh.kg}^{-1}_{\text{SO}_3(l)}$$

Décharge :
T = 500 – 600°C
P = 0,1 – 0,5 MPa

الفصل الرابع

مقارنة بين أنظمة

التخزين الحراري

1.IV. مقدمة

تستخدم جميع أنظمة التخزين الحراري المعرفة من قبل (الحساس ، الكامن ، الحراروكيميائي) في ثلاث خطوات رئيسية:

التخزين ، الشحن والتفريغ.و يمكن التعرف على عدد كبير من وسائل التخزين وفقا (لخصائصها ودرجة حرارة استخدامها، النوع المطلوب من التخزين و مجال التطبيق المستهدف).وبالتالي اختيار نظام التخزين يقوم وفق معايير [14].

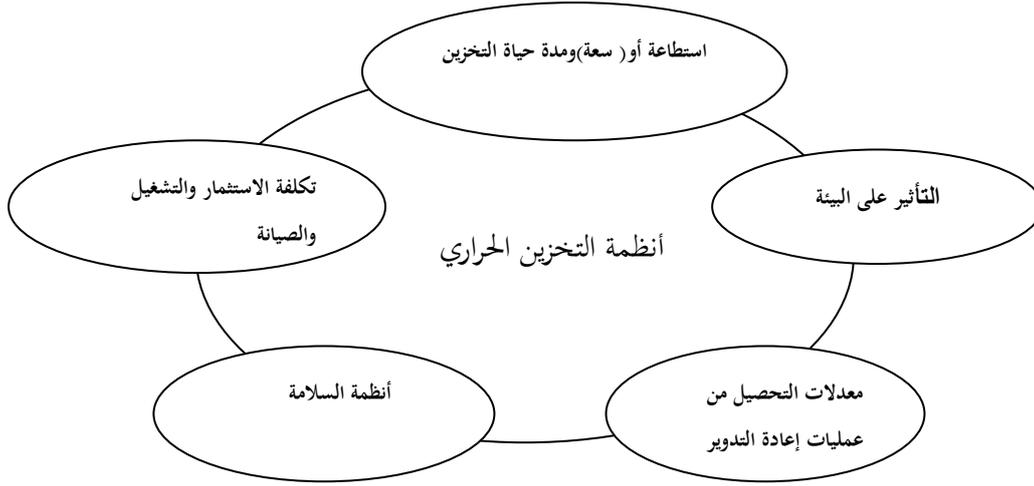
2.IV. معايير اختيار وتصميم نظم التخزين

كمية الطاقة المخزنة والمستعادة ترتبط بالسعة الحرارية ، فهي النقطة الرئيسية في تصميم نظام التخزين، لكن اختيار تكنولوجيا التخزين أمر بالغ الأهمية يقوم على عدة معايير أخرى تعتمد على الحاجة، و ترتبط بمجموعة من المواصفات والقيود التنظيمية والاقتصادية والبيئية ،وكذا عامل الزمن وعدة عوامل أخرى يمكن تلخيصها فيما يلي: (الشكل 1.IV) [9].

✓ كثافة الطاقة ، درجة حرارة و زمن التخزين (تخزين يومي ، تخزين موسمي).

✓ خصائص مواد التخزين : وتشمل المعايير التالية :

- معايير ترموديناميكية (درجة حرارة انصهار، السعة الحرارية، والموصلية الحرارية.....).
- معايير فيزيائية وكيميائية (الاستقرار الكيميائي،الحجم المستنفذ، عدم حدوث التحلل والتآكل).
- معيار بيئي: درجة التلوث ، وجود او عدم وجود تسمم
- ✓ المعيار الاقتصادي (تكلفة التصميم ، التشغيل ، الصيانة وإعادة التدوير)، والنضج التكنولوجي.



الشكل 1.IV. معايير اختيار نظام التخزين الحراري [9]

3.IV. مقارنة بين أنظمة التخزين الحراري

1.3.IV. من حيث كثافة الطاقة ، درجة حرارة وزمن التخزين

يقدم الجدول (1.IV) بعض الخصائص الحرارية لأنظمة التخزين الحراري (كثافة الطاقة، درجات حرارة التشغيل لكل نظام، مدة التخزين) [9].

التخزين الحراري الكيميائي	التخزين الكامن	التخزين الحساس	
			الكثافة الطاقوية الكتلية
$\sim 100 - 500 \text{ kwh. m}^{-3}$	$\sim 50 - 100 \text{ kwh. m}^{-3}$	$\sim 15 - 60 \text{ kwh. m}^{-3}$	الكثافة الطاقوية الحجمية
درجة حرارة الشحن او المحيط	درجة حرارة الشحن	درجة حرارة الشحن	حرارة التخزين
غير محدودة	محدودة (ساعات- يوم - شهر)	محدودة (ساعات- يوم - شهر)	مدة التخزين

الجدول 1.IV. يقدم بعض الخصائص الحرارية لأنظمة التخزين الحراري [9]

IV. 1.1.3. كثافة الطاقة في التخزين المحسوس

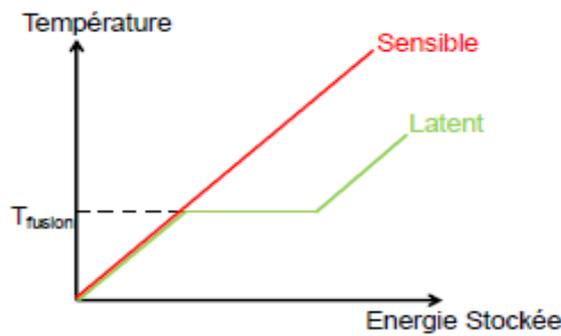
➤ تحليل ومناقشة

لديه كثافة الطاقة تتراوح ($15-60\text{kwh.m}^{-3}$) وتعتبر ضعيفة بالمقارنة مع الأنظمة الأخرى. حيث يتم استخدام تقنيات لتمكين سائل النقل أن يمر مباشرة من خلال مواد التخزين. و إذا كنا نرغب في زيادة كثافة الطاقة، فمن الممكن زيادة التدرج في درجة الحرارة ΔT . ولكن مواد التخزين لها في الغالب درجة حرارة تشغيل قصوى لا يمكن تجاوزها.

IV. 2.1.3. كثافة الطاقة في التخزين الكامن

➤ تحليل ومناقشة

كثافة الطاقة بين ($50-100\text{kwh.m}^{-3}$) وهي كثافة عالية بالمقارنة مع النظام المحسوس. ميزة أخرى هي استعادة الحرارة في درجة حرارة ثابتة (الشكل 2.IV) [13]. ففي هذا النوع من التخزين، كمية الطاقة المخزنة والمستردة تعتمد فقط على كتلة المواد وحرارتها الكامنة ($\Delta H = mL_f$)، ونحتاج فقط إلى الحد الأدنى من التدرج في درجة الحرارة بين مائع النقل ودرجة حرارة MCP لضمان نقل الحرارة. في كثير من الأحيان، التدرج في درجة الحرارة بين سائل النقل ودرجة حرارة الانصهار حوالي 15°C . قد يكون في الواقع رفع في درجات الحرارة للمواد، وبالتالي تخزين جزء من الحرارة المحسوسة، يكون غير مهم.



الشكل 2.IV. منحني درجة الحرارة - الأنتالبي لنظام تخزين حرارة كامنة [13]

يقدم (الجدول 2.IV) [10] مثال تطبيقي يقارن كثافة الطاقة المخزنة بين التخزين الكامن والمحسوس لنفس حجم التخزين.

خصائصه	خلات هيدرات الصوديوم (Acétate trihydrate de sodium) (MCP)
T_{fusion}	55 -58 °C
L_f	242,85.10 ³ J/Kg
$c_p MCP solide$	3,31.10 ³ J/Kg à 30 ° C
$c_p MCP liquide$	3,06.10 ³ J/Kg à 70 ° C
$\rho iquide$	1279Kg/m ³ à 70° C
$\rho solide$	3Kg/m ³ à 30° C

الجدول IV. 2. يقدم خصائص MCP (خلات هيدرات الصوديوم) [10]

• حساب الكثافة الطاقوية:

• الطاقة $E_{MCP 30-70C}$ المخزنة في 1m³ بين 30° C و 70° C هي :

$$E_{MCP30-70^{\circ}c} = V \times \rho_{solide} \times C_p MCPsolide \times \Delta T_{solide} + V \times \rho_{solide} \times L_f + V \times \rho_{liquide} \times C_p MCPliquide \times \Delta T_{liquide}$$

$$= [1 \times 1392 \times C_p MCP solide \times (55 - 30)] + [1 \times 1392 \times L_f] + [1 \times 1279 \times C_p MCP liquide \times (70 - 58)]$$

$$= 5,00.10^8 joules = 139KWh$$

• على نفس مجال درجة الحرارة، ونفس الحجم من الماء (1m³) تخزن الكمية التالية:

$$E_{eau 30-70^{\circ}c} = V \times \rho_{eau} \times C_p eau liquide \times \Delta T_{eau} = 1 \times 1000 \times 4186 \times (70 - 30)$$

$$= 167,44 \times 10^6 joule = 46,4KWh$$

$$\frac{E_{MCP30-70^{\circ}c}}{E_{eau30-70^{\circ}c}} = 3 \quad \text{النتيجة}$$

- نجد ان MCP يسمح بتخزين أكثر من 3 مرات بالزيادة لنفس الحجم بالمقارنة مع الماء. ولذلك لديها كثافة طاقة أعلى.

IV. 2.1.3. كثافة الطاقة في التخزين الحراري كيميائي

➤ تحليل ومناقشة

تحقق نظريا كثافة تخزين جوهريّة متفوقة على الأنظمة المحسوسة والكامنة كما يوضحه (الجدول 1.IV) أعلاه .
($100-500\text{kw.m}^{-3}$) فكثافة الطاقة الحجمية أو الكتلية هي على التوالي 5-10 أضعاف بالمقارنة مع الأنظمة الأخرى .
كما أن تخزين الطاقة في روابط المركبات الكيميائية لا يحتاج إلى درجة حرارة معينة فيمكن تخزينها حتى في درجات حرارة الغرفة العادية دون الحاجة إلى عزل وميزة أخرى يمكن أن نلاحظها من خلال مدة التخزين وطول مسافة نقل الحرارة غير المحدودة.

❖ **حوصلة:** التخزين الكامن لديه أفضلية من حيث كثافة الطاقة العالية وعلاوة على ذلك، استعادة الحرارة في درجة حرارة ثابتة ييسر استخدامها وضمان جودة طاقة مستقلة عن التدرج في درجة الحرارة بين سائل النقل ومواد التخزين إذا ما قورن بالتخزين الحساس لكن نظريا كثافة التخزين بالنسبة للنظام الحراري كيميائي تعتبر عالية جدا بالمقارنة مع كلا النظامين (الحساس والكامن) بالإضافة إلى ميزة طول مدة ومسافة النقل فهذا يؤهل نظام التخزين الحراري كيميائي في أن يكون الأفضل من حيث التخزين الموسمي .

IV. 2.3. من حيث خصائص مواد التخزين المستعملة

IV. 1.2.3. مواد التخزين الحساس السائلة

بعض مواد التخزين الحساس الصلبة ملخصة في (الجدول 3.IV) [15].

وسط التخزين	درجة حرارة التخزين (K)	الكثافة (kg/m^3)	التوصيلية الحرارية (W/m.K)	السعة الحرارية (kJ/kg.K)
الملح الشمسي HITEC	133 - 120	1990	0.6	-
الزيوت المعدنية	300 - 200	770	0.12	2.6
الزيوت الصناعية	350 - 250	900	0.11	2.3
زيت السيليكون	400 - 300	900	0.1	2.1
أملاح النتريت	450 - 250	1825	0.57	1.5
املاح النترات	565 - 265	1870	0.52	1.6
أملاح الكربونات	850 - 450	2100	2	1.8
الصوديوم السائل	530 - 270	850	71	1.3

الجدول 3.IV. يقدم خصائص بعض مواد التخزين الحساس السائلة [15]

تحليل ومناقشة

يتضح من خلال الجدول اتساع نطاق درجة حرارة التخزين . فمثلا الماء يعتبر وسط جيد للتخزين في درجات حرارة منخفضة فله حرارة نوعية مرتفعة بالمقارنة مع المواد الأخرى إلا انه يحتاج إلى عزل جيد وخزان مقاوم للضغط المرتفع .

الزيوت المعدنية مثلا ، على الرغم من أنها غير مكلفة نسبيا حوالي (4.2 \$/kWh) [16]، لديها درجة حرارة تخزين عالية، الأمر الذي يجنب استخدامها لدرجات حرارة أقل من 300°C . الزيوت الاصطناعية يمكن، في المقابل، أن تستخدم ما يزيد على 400°C لكن لديها مشاكل تسمم. وكذلك أملاح النترات المنصهرة لديها درجة حرارة تغيرها عالية الأمر الذي يتطلب سيطرة كاملة على الظروف الحرارية للتركيب ، وذلك لتجنب البقع الباردة في التركيب الذي يمكن ان تؤدي إلى تصلب الأملاح، والحد من التآكل عند استخدامها.

IV.2.2.3. مواد التخزين الحساس الصلبة

بعض مواد التخزين الحساس الصلبة ملخصة في (الجدول 4.IV) [19].

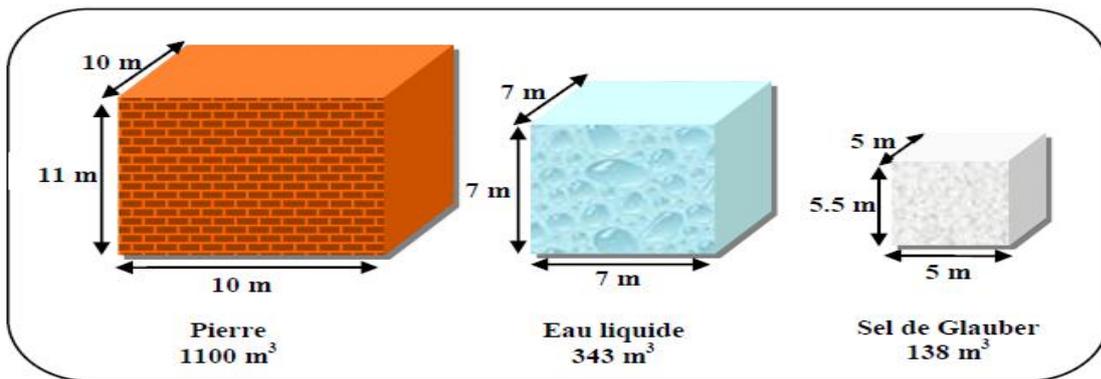
وسط التخزين	الكثافة (kg/m^3)	الحرارة النوعية (J/kg.K)	السعة الحرارية (kJ/kg.K)	التوصيلية الحرارية (W/m.K)
الألمنيوم	2707	896	2.4255	$204(\text{à}20^{\circ}\text{C})$
أكسيد الألمنيوم	3900	840	3.2760	-
كربونات الألمنيوم	2710	750	2.0325	-
الطوب	1698	840	1.4263	$0.69(\text{à}19^{\circ}\text{C})$
طوب المغنيزيوم	3000	1130	3.3900	5.07
الاسمنت	2240	1130	2.5310	0.9- 1.3
الفولاذ	7900	837	3.6123	29.3
الحديد الصافي	7897	452	3.5694	$73(\text{à}20^{\circ}\text{C})$
كلوريد الكالسيوم	2510	670	1.6817	-
النحاس	8954	383	2.4294	$385(\text{à}20^{\circ}\text{C})$
طين رطب	1700	2093	3.5583	2.51
طين جاف	1260	795	1.0017	0.25
كلوريد البوتاسيوم	1980	670	1.3266	-
كربونات البوتاسيوم	2660	920	2.4472	-
كربونات الصوديوم	2510	1090	2.7359	-
حجر الغرانيت	2640	820	2.1648	1.73 - 3.89
حجر الكلس	2500	900	2.2500	1.26 - 1.33
حجر الرخام	2600	800	2.0800	2.07 - 2.94
حجر رملي	2200	710	1.5620	1.83

الجدول 4. IV. يقدم بعض مواد التخزين الحساس الصلب [19]

➤ تحليل ومناقشة

مثلا في حالة المواد طوب و الاسمنت والرمل كثافة الطاقة منخفضة بالمقارنة مع باقي المواد إلا أن وفرتها وقلة تكاليفها يجعل تطبيقها واسع ومتاح . كذلك لديها توصيلية حرارية منخفضة إذا ما قورنت بمواد تخزين معدنية أخرى لديها كثافة طاقة مرتفعة، لا سيما بعض المعادن مثل الفولاذ أو الحديد، الذي يمكن أن تصل إلى قيم 400 w/m^3 على نطاق درجة حرارة 100°C ، وكذلك كثافته الحجمية العالية (للحديد 7897 kg/m^3 وللحديد و 7900 kg/m^3 للفولاذ). ومع ذلك التكلفة العالية تحد تنميتها وربحيتها [16]. وخلافا للتخزين في الوسط السائل ، التخزين في الوسط الصلب يمكن أن تستخدم للتطبيقات مرتفعة ومنخفضة درجة الحرارة، ودون الحاجة إلى القلق حول مشكلة ضغط البخار في حالة الماء والقيود المفروضة على تقديم سوائل أخرى للتخزين (التآكل والاستقرار والسلامة ...). يتم استخدام مجموعة واسعة من المواد الصلبة.

الحديد الزهر هو المادة الأكثر فعالية فيما يتعلق بكثافة التخزين التي تتجاوز الماء [17]. ومع ذلك هذه المادة هي مكلفة جدا كما ذكرنا سابقا، مقارنة مع غيرها من المواد (الخرسانة والطوب والحجر والرمل ...)، وفترة الاسترجاع لها معتبرة جدا. لتطبيقات الطاقة الشمسية الخرسانة والحجر هي المواد الأكثر استغلالا والأكثر مناسبة للتطبيقات في قطاع البناء [18]. على سبيل المثال، من اجل تغير في درجة الحرارة 50°C ، الخرسانة والحجر تخزن حوالي 36 kJ/kg . يوضح (الشكل 3.IV) [9] المقارنة المثالية للحجم المطلوب لتخزين نفس الكمية من الطاقة المخزنة ($143,4 \cdot 10^8 \text{ J}$).



الشكل 3.IV. الحجم اللازم لنفس كمية الطاقة المحسوسة المخزنة [9]

يتضح لنا أن التخزين الحساس في الوسط الصلب يتطلب حجم أكبر من التخزين في الوسط السائل

❖ **حوصلة:** في التخزين الحساس مواد التخزين متاحة ومتوفرة بشكل كبير إلا أن الحاجة إلى العزل وكثافة الطاقة المنخفضة

تجعلنا نسعى لتطوير طرق أخرى تضمن لنا كثافة طاقة عالية وتقلل الضياع الطاقوي .

IV.3.2.3. مواد التخزين الكامن MCP

يتم عن طريق استخدام مواد تغيير الطور كما ذكر سابقا لذلك سنعرض مجموعة من الاعتبارات والتي يتم من خلالها اختيار مادة

التخزين المناسبة للتخزين المعطى (الجدول IV 5) [10].

<ul style="list-style-type: none"> - مستوى درجة الحرارة مرحلة تغيير الذي يعتمد على التطبيق - قيمة الحرارة الكامنة لانصهار 130kJ/kg (لتكون قادرة على المنافسة) - الموصلية الحرارية العالية لحركية الشحن والتفريغ بسرعة - ضغط البخار منخفض لتقليل مشاكل مقاومة ضغط أنظمة التخزين اختيار مادة التخزين المناسبة يقوم على مجموعة من المعايير الخصائص الفيزيائية: - تغيير طفيف على مستوى الحجم أثناء تغيير الحالة من اجل أبعاد تصميم التخزين ومقاومة الضغط، - كثافة عالية بحيث MCP قد توفر تخزين كافي في أصغر حجم ممكن - انصهار منسجم عند استخدام جسم مركب. 	<p>اعتبارات حرارية:</p>
<ul style="list-style-type: none"> - حركية الشحن والتفريغ بشكل أسرع - تجنب البرودة الفائقة تضعف الحركية و قدرة التخزين البارد. اعتبارات الاستقرار والتوافق مع غيرها من المواد - استقرار الجسم في الدورات الحرارية - التوافق مع مواد حاوية التخزين من اجل كل الأطوار لتفادي مشاكل التآكل ، التفاعلات الكيميائية أو التفاعل الكهروكيميائي 	<p>اعتبارات الحركية:</p>
<ul style="list-style-type: none"> - الاستقرار الكيميائي في الجسم مع مرور الوقت ودرجات الحرارة - معدل تبلور جيد - القابلية للاشتعال - غير سامة . 	<p>الاعتبارات الكيميائية:</p>
<ul style="list-style-type: none"> - تكلفة معقولة و تكون متوافرة. 	<p>الاعتبارات الاقتصادية:</p>

الجدول IV.5. اعتبارات اختيار مادة MCP للتخزين الحراري الكامن

يقدم (الجدول 6.VI) بعض خواص مواد تغيير الطور (صلب- سائل) العضوية وغير العضوية [10].

الخصائص	MCP عضوية	MCP غير عضوية
الحرارة النوعية (kJ/kg)	2	2
الحرارة الكامنة (kJ/kg)	190	230
كتلة تخزين (10J en kg)	5300	4350
حجم تخزين (10J en m ³)	6.6	2.7

الجدول 6. IV. بعض خواص مواد تغيير الطور (صلب-سائل) العضوية وغير العضوية [10]

تحليل ومناقشة

يتضح من الجدول الكثافة العالية وانخفاض حجم التخزين للمواد MCP بالمقارنة مع مواد التخزين الحساس خاصة مواد MCP غير العضوية وهذا يعتبر فائدة للتقليل من التكاليف بتوفير طاقة عالية بحجم أقل . ويمكن توضيح ذلك بالرجوع إلى

المثال في (الجدول IV 2). لمقارنة حجم تخزين نفس الكمية من الطاقة بين التخزين الكامن والحساس [10].

✓ لتخزين مثلا 100kwh في المجال $55^{\circ} C - 58^{\circ} C$ نحتاج إلى حجم الماء وMCP كالتالي :

$$V_{eau} = \frac{P_{stockage}}{C_{p\ eau} \times \rho_{eau} \times \Delta T} = \frac{100000 \times 3600}{4186 \times 1000 \times (58 - 55)} = 28.7 m^3$$

$$V_{MCP} = \frac{P_{stockage}}{L_f\ MCP \times \rho_{MCP}} = \frac{100000 \times 3600}{242,85 \times 10^3 \times 303,103} = 1.1 m^3$$

$$\frac{V_{eau}}{V_{MCP}} = 26 \text{ النتيجة}$$

❖ حوصلة: حجم MCP المستخدم للتخزين بين الدرجتين $55^{\circ} C - 58^{\circ} C$ اصغر من حجم الماء ب 26 مرة. فهي

أكثر تخزين .

✓ مواد MCP غير العضوية

يقدم (الجدول 7.IV) خصائص حرارية لبعض أهم مواد MCP غير العضوية [20.14].

نوع المادة	المركبات	درجة حرارة الانصهار ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Δ (kJ/kg)	التوصيلية الحرارية ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	الكثافة ($kg.m^{-3}$)
مواد غير عضوية	H ₂ O	0	333	0.612 liq à 20°C	988 liq à 20°C 917 sol à 0°C
	C ₃ Cl ₂ .6H ₂ O	29	190.8	0.540 liq à 38.7°C 1.088 sol à 23°C	1562 liq à 32°C 1802 sol à 24°C
	Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	89	162.8	0.490 liq à 95°C 0.611 sol à 37°C	1550 liq à 94°C 1636 sol à 25°C
	MgCl ₂ .6H ₂ O	117	168.6	0.570 liq à 120°C 0.694 sol à 90°C	1450 liq à 120°C 1569 sol à 20°C
مواد غير عضوية سهلة الانصهار	58.7% Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O +41.3%MgCl ₂ .6H ₂ O	59	132.2	0.565 liq à 85°C 0.678 sol à 38°C	1550 liq à 50°C 1630 sol à 24°C

الجدول 7.IV. خصائص حرارية لبعض أهم مواد MCP غير العضوية [20.14]

➤ تحليل ومناقشة

يتضح من الجدول ثلاث ميزات لهذه المواد: التوصيلية الحرارية العالية، الكثافة الطاقوية العالية، نقطة الانصهار الصافية، وهذه الخصائص من أهم خصائص التخزين الجيد بالإضافة إلى مزايا أخرى و بعض العوائق التي يمكن مواجهتها في هذا التخزين .

✓ مزايا أخرى: الحرارة الكامنة عالية، متاحة بكميات كبيرة، منخفضة التكلفة، قابل للاشتعال، السعة الحرارية الكتلية

عالية [28.20.14].

● المعوقات: العزل، التآكل، البرودة الفائقة، الشيخوخة السريعة [28.20.14].

✓ مواد MCP العضوية

يقدم (الجدول IV. 8.) خصائص حرارية لبعض أهم مواد MCP العضوية [20.14].

نوع المادة	المركبات	درجة حرارة الانصهار ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	التوصيلية الحرارية ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	الكثافة ($kg.m^{-3}$)
مواد عضوية	برافين $C_{21}-C_{50}$	68-66	189	0.83 liq à 70°C 0.930 sol à 20°C
	نافثالين	80	147.7	976 liq à 84°C 1145 sol à 20°C
مواد عضوية سهلة الانصهار	نافثالين + 67.1% حمض البنزويك 32.9%	67	123.4	n.d. 0.130 liq à 100°C 0.282 sol à 38°C
أحماض دهنية	حمض الكابريك	32	152.7	878 liq à 45°C 1004 sol à 24°C
	حمض الستياريك	69	202.5	848 liq à 100°C 965 sol à 24°C

الجدول IV.8. خصائص بعض مواد التخزين العضوية [20.14]

➤ تحليل ومناقشة

يتضح من خلال معطيات الجدول ميزة اتساع مجال درجة حرارة الانصهار لهذه المواد لكن بالمقارنة مع المواد غير العضوية لديها توصيلية حرارية منخفضة وكثافة طاقوية أقل وهذا سيؤثر على كثافة التخزين والتبادل الحراري بين مواد التخزين وسائل نقل الحرارة عموماً يمكن حصر مزاياها وعيوب استعمالها.

- **المزايا** : متاحة في نطاق واسع من درجة الحرارة ، لا تحتاج إلى فصل ، مستقرة كيميائياً ، لا يوجد تآكل ، قابلة لإعادة التدوير [28.20.14].

- **العيوب** : التوصيلية الحرارية المنخفضة ، الحرارة الكامنة منخفضة ، غير قابل للاشتعال ، الحرارة النوعية الكتلية المنخفضة ، التكلفة العالية ، كثافة منخفضة [28.20.14].

بالنسبة للمواد سهلة الانصهار العضوية وغير العضوية لديها ميزة نقطة الانصهار المشابهة لمادة نقية غير أنها كذلك تعاني من بعض مشاكل التي تعيق استخدامها [28] وهي :

قلة البيانات المعروفة على الخصائص الحرارية لهذه المواد ، الاستخدام المحدود في النظم الصناعية.

❖ **حوصلة:** التخزين في MCP يحتوي على مزايا كثافة الطاقة المرتفعة وصغر حجم التخزين مقارنة بالنظام المحسوس أي الحد من حجوم التخزين وبالتالي التقليل من تكاليف التصميم . كذلك إمكانية التخزين في درجات حرارة منخفضة إلا أن مشكلة العزل التي تبقى قائمة كذلك في هذا النظام كذلك بعض مشاكل تغير الطور كزيادة الضغط يجعل تطبيقها ليس بالأمر البسيط كالتخزين المحسوس.

IV.2.3.4. التخزين الحراري كيميائي:

من أجل تحديد التفاعل المناسب لنظام تخزين حراري كيميائي معايير النظام تم تعريفها من قبل (Chen و Wentworth عام 1976) [21]. المعايير هي كالتالي:

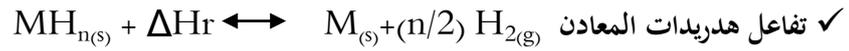
- تفاعل ماص للحرارة: درجة الحرارة أقل $1000 >$ درجة مئوية .
- تفاعل الناشر للحرارة : نطاق درجة حرارة $320^{\circ}\text{C} < T < 1000^{\circ}\text{C}$.
- ΔH_r كبير وحجم مولي صغيرة لزيادة كثافة التخزين.
- التفاعل عكسي تماما.
- تفاعل سريع .
- يجب أن تكون النواتج سهلة الفصل ومستقرة (اقل تفاعل مع الماء والأكسجين) خلال فترة التخزين .
- المنتجات المستخدمة يجب معالجتها بسهولة (مفهوم السلامة) .
- يجب أن تكون العملية مربحة بقوة.
- إعادة التجربة متاح .

نعرض بعض خصائص التخزين الحراري لبعض هذه التفاعلات المستعملة بكثرة في (الجدول IV. 9) [21].

الكثافة الطاقوية (kWh/m^3)	درجة حرارة التفاعل $^{\circ}\text{C}$	التفاعل
580	Charge 380/décharge 230 $P_{\text{H}_2}(0.14 / 0.44) \text{MPa}$	$\text{MgH}_2 + \Delta H \leftrightarrow \text{Mg} + \text{H}_2$
692	Charg 750/décharge 750 $P_{\text{CO}_2}(0 / 20200) \text{Pa}$	$\text{CaCO}_3 + \Delta H_r \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
388	Charge 350/décharge 90-200 $P_{\text{H}_2\text{O}}(0 / 47400-203000) \text{Pa}$	$\text{Mg}(\text{OH})_2 + \Delta H_r \leftrightarrow \text{MgO} + \text{H}_2\text{O}$

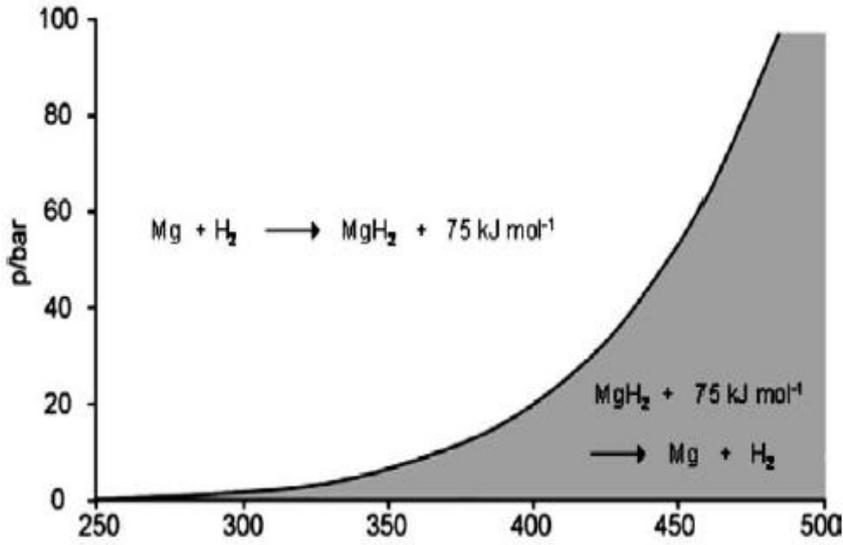
الجدول IV. 9. الخصائص الحرارية لأكثر التفاعلات استعمالا في التخزين الحراري كيميائي [21]

يلاحظ من الجدول ارتفاع كثافة الطاقة ودرجة حرارة التفاعل وهذه تعتبر أهم مزايا هذا النظام ، لكن لكل تفاعل من هذه التفاعلات ميزات أخرى وبالمقابل بعض المشاكل التي تواجه استخداماته.



مثال: هيدريد المغنيزيوم $MgH_{2(s)} + \Delta Hr \leftrightarrow Mg_{(s)} + H_{2(g)}$. بيانات توازن هذا التفاعل مقدمة في

(الشكل 4.IV) [21].



الشكل 4.IV. بيانات توازن التفاعل العكسي لهيدريد المغنيزيوم [21]

➤ تحليل ومناقشة

يتضح من المنحنى ميزة ارتفاع درجة حرارة التفاعل (350°C–450°C) لكن في نفس الوقت معرض لخطورة ارتفاع ضغط

غاز H_2 .

✓ مزايا أخرى للتفاعل : عكس اتجاه التفاعل (مقدار 600 دورة ممكن) ، لا توجد نواتج ثانوية ، فصل النواتج (غاز /

الصلبة) ، يمكن إعادة التفاعل [21].

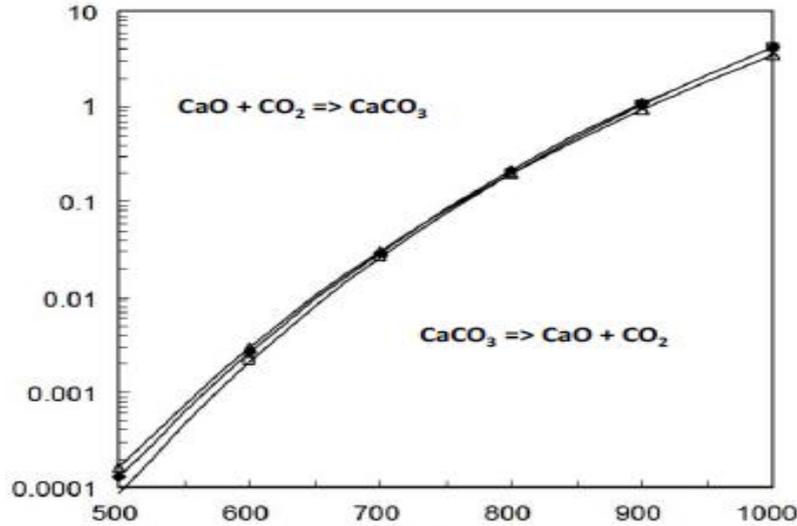
✓ عيوب التفاعل : تخزين H_2 ، حركية التفاعل تبقى بطيئة (عدة ساعات) ، تخدير المواد الحديد مع Fe أو النيكل Ni ،

التكلس ضغط التشغيل (50 bar– 100 bar) ، الانتقال الحراري (الصلب / الجدار) [21].



مثال : تفاعل كربونات الكالسيوم $CaCO_{3(s)} + \Delta Hr \leftrightarrow CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$. بيانات توازن التفاعل مقدمة في

(الشكل 5.IV) [21].



الشكل 5.IV. بيانات توازن التفاعل العكسي لكربونات الكالسيوم [21]

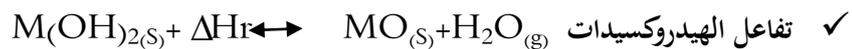
➤ تحليل ومناقشة

يتضح من المنحنى ميزة الارتفاع الكبير لدرجة حرارة التفاعل الحرارة بين ($1000^{\circ}C - 600^{\circ}C$) إلا أن هذا التفاعل مرتبط بخطورة ارتفاع ضغط غاز CO_2 .

✓ **مزايا أخرى للتفاعل** : لا يحتاج إلى تحفيز ، لا توجد نواتج ثانوية ، فصل النواتج (غاز / الصلب) ، توافر المنتج وسعره في

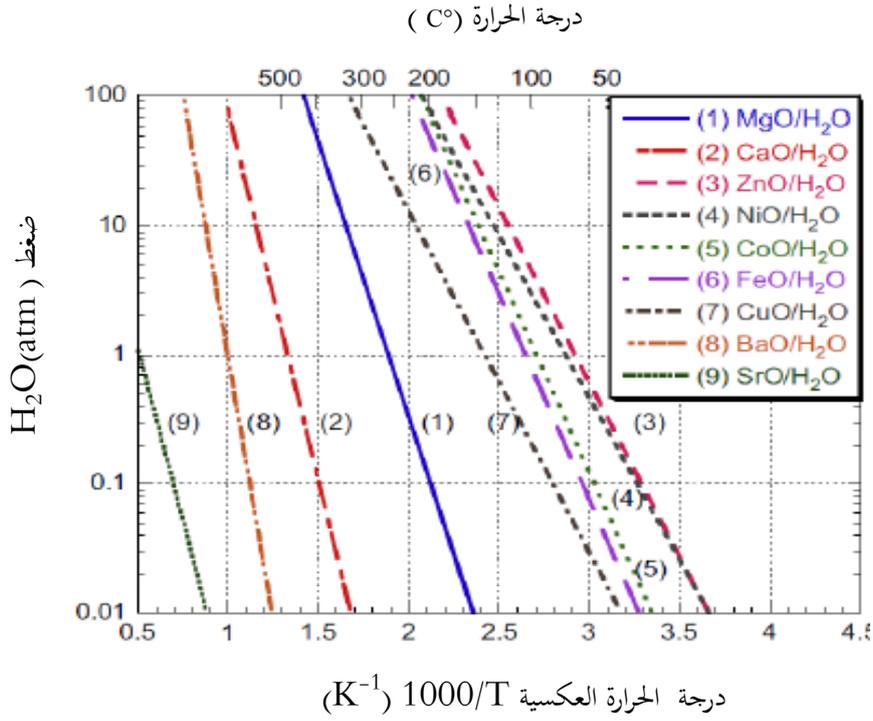
المتناول ، إنتاج أكسيد الكالسيوم الذي يطور استعماله في المجال الصناعي ، يمكن إعادة التفاعل [21].

✓ **عيوب التفاعل** : التكلس ، تخزين CO_2 ، الموصلية الحرارية المنخفضة ، تخدير المواد [21].



مثال : تفاعل هيدروكسيد المغنيزيوم $Mg(OH)_{2(s)} + \Delta Hr \leftrightarrow MgO_{(s)} + H_2O_{(g)}$. بيانات توازن التفاعل مقدمة

في (الشكل 6.IV) [21] .



الشكل 6.IV. بيانات توازن التفاعل العكسي للهيدروكسيدات [21]

➤ تحليل ومناقشة

يتضح من المنحنى ميزة ارتفاع درجة حرارة التفاعل ($500^{\circ}C-200^{\circ}C$) إلا أن هذا التفاعل مرتبط بخطورة ارتفاع ضغط بخار الماء.

- مزايا أخرى للتفاعل : لا يحتاج إلى أي محفز ، لا توجد نواتج ثانوية ، فصل النواتج (غاز / الصلب) ، عودة التجربة ~ 15 عاماً [21].

- عيوب التفاعل : درجة حرارة الرطوبة ($200^{\circ}C$) ، تفاعل النواتج (50%) ، تحذير المواد ، انخفاض الموصلية [21].

❖ حوصلة: يظهر لنا ايجابية التخزين الحراروكيميائي ، وذلك بفضل كثافة الطاقة العالية لارتفاع درجات حرارة التشغيل وعدم

حاجته إلى العزل فالمنتجات يمكن تخزينها في درجة حرارة الغرفة دون أي ضياع للحرارة.

3.3.IV. الجانب الاقتصادي والنضج التكنولوجي

3.3.IV.1. تكنولوجيات التخزين الحساس

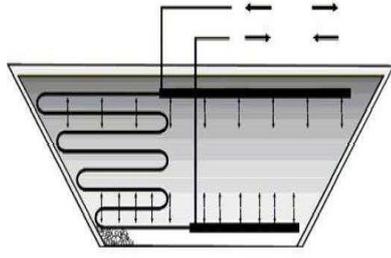
في العادة تستعمل مخازن تحت الأرض (Stockage d'énergie thermique souterraine . SETS). حيث أن الشروط الهيدروجيولوجية لموقع البناء المطلوبة في كثير من الأحيان تجبر على اختيار التقنية المناسبة [14] (الشكل 7.IV).

✓ تقنية مخازن الماء الساخن (Stockage de chaleur à eau chaude): يتكون من خزان مياه مدفون جزئياً، في خرسانة مسلحة.

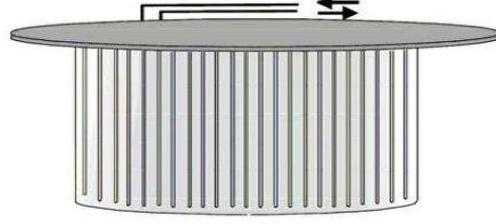
✓ تقنية التخزين في مستودعات المياه الجوفية (Stockage des eaux souterraines): يتم عن طريق اثنين من الآبار التي تم حفرها في طبقة من الصخور المسامية (الحصى والرمل والحجر الجيري) التي تحتوي على المياه الجوفية. في مرحلة الشحن، المياه الجوفية المستخرجة من الحوض البارد (البارد جدا) يسخن بواسطة الطاقة الشمسية ومن ثم حقنها في البئر الساخن (الساخن جدا). ومعرفة تامة للمعادن والجيوكيمياء وعلم الأحياء الدقيقة لباطن الأرض أمر ضروري لهذا النوع من التثبيت. وتقع أهم إنجازات هذا النوع من التخزين في ألمانيا في روستوك، وبرلين، مقر البرلمان الألماني.

✓ تقنية تخزين حصى - ماء (Stockage de Grit - l'eau)، أو المياه الجوفية الاصطناعية: خلق التبادلات في طبقة المياه الجوفية الطبيعية؛ باستعمال مواد التخزين وهي عبارة عن خليط من الحجر والماء. يتم تخزين الحرارة و استردادها عن طريق تبادل مباشر مع الماء أو عن طريق نظام الأنابيب البلاستيكية يتم إدراجها في طبقات مختلفة في وسط التخزين. ونظراً لسعتها الحرارية الضعيفة مقارنة مع الماء، هذا النوع من التخزين يتطلب حجم 50% أكبر من تخزين نظام الماء الساخن من أجل الحصول على سعة التخزين نفسها.

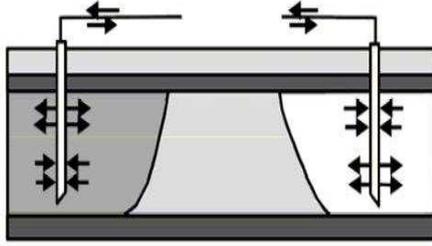
✓ تقنية آبار التخزين (Stockage de chaleur à conduit) : تتطلب التربة التي تتكون من الصخور المشبعة بالماء. في هذا النوع من التثبيت، يتم تخزين الحرارة مباشرة في التربة. التبادل الحراري يكون داخل بئر محفور على عمق يصل إلى 100m. في مرحلة الشحن، يتم توجيه تدفق الحرارة من الوسط نحو حواف النظام؛ وفي الاتجاه المعاكس أثناء التفريغ. مع سعة تخزين متساوية، وهذا التخزين يتطلب حجم 3-5 مرات أكبر من تخزين الماء الساخن.



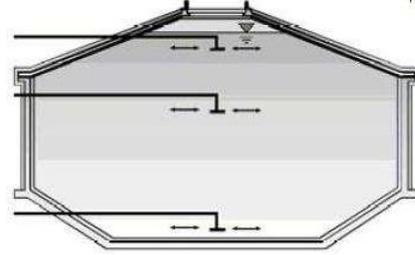
التخزين حصي - ماء



آبار التخزين



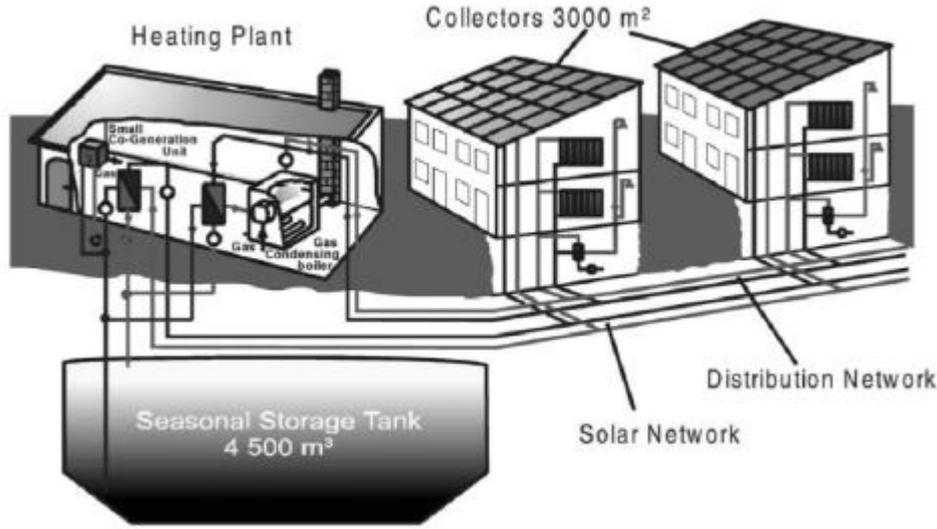
التخزين في مسقذعات المياه الجوفية



تخزين الماء الساخن

الشكل 7.IV. مختلف تقنيات التخزين بالحرارة بالحرارة المحسوسة تحت الأرضي [14.5].

تستخدم أنظمة التخزين الحساس صناعيا في العديد من محطات الطاقة الشمسية الحرارية. فمنذ عام 1995، ظهرت ثماني محطات أوروبية لتوليد الطاقة الحرارية الشمسية [22]. و غيرها من المحطات التي تستخدم اثنين من صهاريج التخزين بالأملاح المنصهرة. أحد هذه المحطات الشمسية (وضع عمليا في عام 1982، وتوقف 1985) ووكالة الطاقة الدولية SSPS (للتشغيل) تستخدم على التوالي خزان حراري (النفط / الصخور) ، وخزان حراري (زيت نقي / الفولاذ). في الآونة الأخيرة، في (GEMASOLAR (Tour solaire/Héliostats)، يوجد نظام تخزين نشط بخزائين ، ومولد طاقة كهربائية مستمر لحوالي 20MW ، وقد تم تنفيذه لمدة 48 ساعة (6-7 يونيو 2011)، هذا يثبت أهمية توليد الطاقة المستمرة في محطة للطاقة الشمسية مزودة بتخزين حرارة محسوسة ويسلط الضوء على متانة الطريقة و تطويرها [9]. ويظهر تشغيل محطة للطاقة الشمسية الحرارية (Hambourg) (الشكل 8.IV) [5].



الشكل 8.IV. محطة شمسية حرارية لتخزين موسمي (Hambourg) [5]

يتم نقل الحرارة بتجميع الطاقة الشمسية إلى المركز عبر مجموعة الشمسية (شبكة الطاقة الشمسية). ويستعمل خزان 4500m^3 من الماء الساخن للتخزين الموسمي لتخزين الحرارة الزائدة. و في فصل الشتاء، يتم توفير الحرارة للمنازل عبر شبكة التوزيع (توزيع الشبكة). حيث يمكن تثبيت مرجل الغاز في المركز ليلعب دور تدفئة مساعدة.

➤ تحليل ومناقشة

تعتبر تكنولوجيا التخزين الحساسة بسيطة واقتصادية وناضجة نسبياً، باختيار مواد التخزين المناسبة و الاستخدام الأكثر شيوعاً للحرارة المحسوسة تخزين الماء الساخن [14]، مما يسمح بتخزين الحرارة على أساس يومي، والتي تحدث في حمولة شبكة الكهرباء فترة "الذروة". أما في حالة تخزين الحرارة الموسمية، الكثافة المنخفضة الطاقوية لمواد التخزين تتضمن حجماً كبيراً. وبالتالي تنفيذ النظام يكون على نطاق واسع. كذلك تعتبر وحدات التخزين اللازمة للتخزين الموسمي في كثير من الأحيان باهظة للاستخدام في المنزل. وهذا هو السبب التخزين الحراري المحسوس الموسمي نادر في المساكن الفردية. وهكذا على حافز الريح، ايجابية التخزين الموسمي تكون عند تثبيت النظام في المناطق السكنية أو المساكن الجماعية .

IV.3.3.2. تكنولوجيا التخزين الكامن

هناك تقنيات مختلفة لتطبيق نظام تخزين الحرارة الكامنة نذكر أهمها :

- ✓ تطبيق تقنية تخزين الجليد : المستخدمة في التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (نظام HVAC: التدفئة، التهوية وتكييف الهواء) . تخزين الجليد اليومي يهدف إلى تسهيل ذروة الاستهلاك خلال أيام الصيف الحارة. ففي البلدان ذات المناخ البارد، درجات الحرارة في فصل الشتاء تخزن موسميا الجليد، حيث يمكن إنشاء هذا الجليد من تدفق الهواء البارد أو تراكم الثلج [14].
- ✓ تطبيقات MCP في المباني: مغلفات من MCP تجعل مهمتها أسهل في بعض التطبيقات، بما في ذلك المباني. يتم تغليف MCP في مظاريف بأشكال مختلفة (لوحات، اسطوانات، كرات) كما ذكر سابقا. هذا الحل يعطي من المزايا زيادة نسبة (سطح / حجم)، و الحد من مسافات نقل الحرارة داخل MCP للخارج مما يقلل أيضا حجم حاوية التخزين انخفاض تفاعل MCP المباشر مع البيئة. واحدة من نقاط الضعف في المباني هو الجمود أي انخفاض العطالة الحرارية، مما أدى إلى تقلبات كبيرة في درجة الحرارة الداخلية. الاندماج داخل عناصر بناء لل MCP المغلفة قد تسمح بتخفيف هذه الظاهرة [28.24] (الشكل a.9.IV) و (الشكل b.9.IV).

إدخال MCP في عناصر المبنى يسمح لتسهيل إعطاء لمحات لدرجات الحرارة الداخلية. وتعتمد هذه التقنية في حالة التخزين اليومي للحرارة. تستخدم تطبيقات MCP في المبنى أيضا في تسخين الماء بالطاقة الشمسية. ففي خزان الماء الساخن، عدم وجود الطبقات الحرارية، وهذا يعني أن درجة الحرارة موحدة في جميع أنحاء الخزان، ويمكن أن يكون مشكلة. إذا كانت درجة الحرارة منخفضة جدا، فالمياه لا يمكن أن تستخدم لدورة تسخين المياه المحلية. إدماج كبسولات MCP مختلفة تعمل على خلق طبقات حرارية للماء ؛ درجة حرارة الطبقة تتوافق مع درجة حرارة انصهار المواد المختلفة. لذلك، يتم زيادة السعة التخزينية مع تقليل حجم خزان الماء الساخن [25].



الشكل 9.IV.a. صورة لمبنى بالأبعاد (2.4mx2.4mx2.4m) (béton+MCP) [28.25]



الشكل 9.IV.b. مبنى بعازل من البوليوريثان (polyuréthane) و MCP [28.24]

✓ تطبيق MCP في التخزين الموسمية : يتطلب التخزين الحراري على المدى الطويل حجوم تخزين كبيرة ، ومن هنا جاء اختيار المواد ذات كثافة طاقة كبيرة ضروري لضمان تماسك النظام. في هذا الصدد ، اختيار من الملح الرطب يمثل خيارا أكثر جاذبية ، إلا أنها تتميزها بفصل المرحلة والتآكل بين الملح ومواد الحاوية يحد من تطوير مشاريع التخزين الموسمية للحرارة الكامنة. استخدام MCP هو أكثر ملاءمة لتخزين الحرارة اليومية [14].

ولقد بذلت غالبية الدراسات على هذه التكنولوجيا على نطاق المختبر أو نموذجي. أهمها مشروعين ، مشروع DISTOR (2004/2007) ومشروع (ITES 2010) ، ونفذت نماذج كبيرة ، نموذج أولي الحجم 100 kWth بسعة تخزين فعلية

58 kWth باستعمال 2100kg من خليط (NaNO₃ %54 و KNO₃ 46%) تم اختباره في مصنع الطاقة الشمسية في إسبانيا . ونموذج [DISTOR (centrale à capteurs cylindro-paraboliques) d'Almería] لتخزين (محسوس / كامن / محسوس) بقدره 1 MWth في (la centrale d'Endesa) في إسبانيا في عام 2009 ، وحدة تخزين الحرارة الكامنة تحتوي على 14 طنا من NaNO₃ [9].

➤ تحليل ومناقشة :

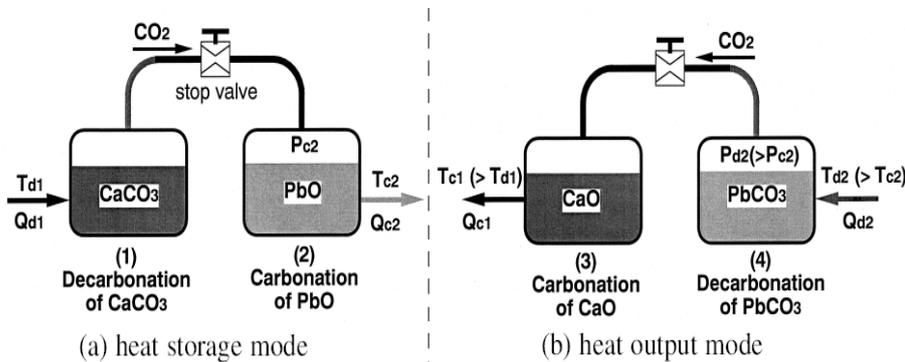
تكنولوجيا التخزين عن طريق الحرارة الكامنة لم يتطور بعد صناعيا . لذلك يجب أن يتم بذل جهد بحثي كبير وتكلفة على تحسين نقل الحرارة على هذا النوع من الأنظمة المجدية والفعالة . واقترحت بعض الحلول لتحقيق هذه الأهداف هي : زيادة سطح التبادل بين ناقل الحرارة ومواد تغيير الطور، استخدام مواد مركبة بتوصيلية جيدة . استخدام وسيلة وسيطية لنقل حرارة سائل نقل الحرارة.

IV. 3.3. 3. تكنولوجيا التخزين الحراروكيميائي

غالبية الدراسات التي أجريت أواخر 1990 إلى بداية 2000 ، من قبل مختبرات معاهد يابانية وأوروبية [14] . سمحت بتطوير ومحاكاة مضخات حراروكيميائية وأنظمة تخزين موسمية لتسخين الماء وتدفع المنازل.

✓ المضخة الحرارية الكيميائية: هذه الأنظمة، التي تعمل في درجات حرارة عالية، وأكثر توجهها تخزين الحرارة الضائعة الأوساط

الصناعية [7.14] (الشكل 10.IV)



شحن

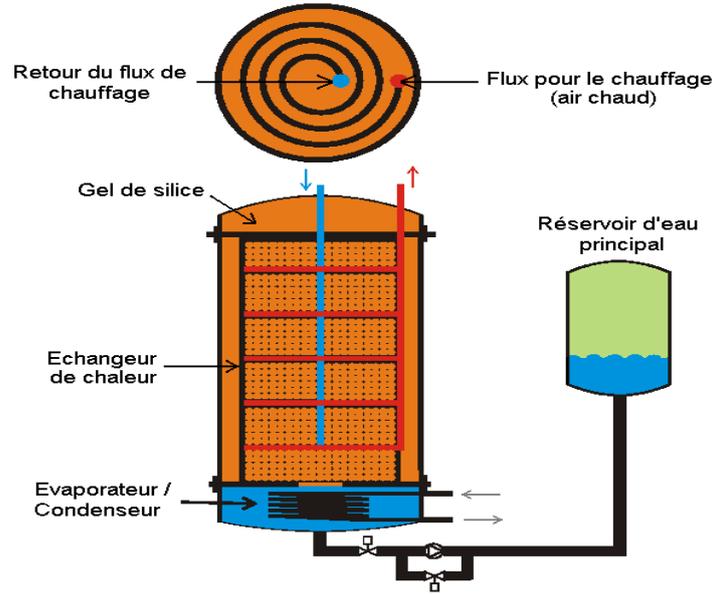
تفريغ

الشكل 10.IV. مبدأ مضخة حراروكيميائية CaO/CO₂/PbO [7.14]

في البداية، يمتلئ المفاعلين بكاربونات الكالسيوم CaCO_3 من جهة، وأكسيد الرصاص PbO من جهة أخرى . في وضع التخزين، كاربونات الكالسيوم CaCO_3 تستقبل الحرارة من مصدر Qd1 ، فيسمح لها أن تتحلل إلى أكسيد الكالسيوم و غاز CO_2 . يتفاعل CO_2 مع PbO ويتم استرداد الحرارة المستهلكة في تفاعل الكربونات . في مرحلة التفريغ، يتم عكس الأدوار ويتم استرداد الحرارة من الكربونات [7.14] .

✓ مشروع **MODESTORE** : ويهدف المشروع MODESTORE لتطوير نظام التخزين الحراري الموسمي

لتسخين الماء في المنازل والتدفئة المنزلية الفردية (الشكل 11.IV) [26.14].



الشكل 11.IV. نموذج MODESTORE [26.14]

يتم تجميع وحدة امتصاص وحدة المبخر / مكثف في نفس الحامل . الجزء العلوي من الجهاز يحتوي على مبادل حراري والذي ينقل الطاقة من مصدر الحرارة (الهواء الخارجي وتدفئة مساعدة) إلى هلام السيليكا (أكسيد السيليكون) خلال مرحلة الشحن (الصيف). نقل الحرارة يحدث من هلام السيليكا إلى داخل الإسكان في الفترة التفريغ (الشتاء). الجزء السفلي يضم المبادلات الحرارية في وجود المبخر خلال التفريغ و مكثف أثناء الشحن. يتم تخزين الماء المكثف في خزان .. في فترات البرد، يتم ضخ كمية صغيرة من الماء المبخر للامتصاص على هلام السيليكا عند الحاجة. امتزاز هلام السيليكا التي تحدث في حوالي 100°C واستخدام الألواح الشمسية التقليدية الحرارية (مستوية) كافية لتشحن التخزين.

➤ تحليل ومناقشة

تقنيات النظام الحراروكيميائي معقدة ومكلفة ويصعب السيطرة عليها و لا تزال قيد التطوير لحد الآن لكن يجب ان نشير الى انه من خلال تطوير طريقة التخزين حرارو كيميائي ، يمكن تنفيذ جيل جديد من نظم تخزين الطاقة الحرارية في تجميع الطاقة الشمسية الحرارية، وبالتالي الحد من حجوم التخزين، لنقل الطاقة واستعادتها في درجات حرارة مراقبة تماما، ولكن الحرارة مخزنة أيضا درجات حرارة عالية (فوق 400°C). اليوم، وضع مثل هذا النظام هو التحدي التكنولوجي. و في الوقت الحالي، البحث على تخزين الطاقة الحرارية بدأ في الإيقاظ، قد يكون هناك استشهاد بمراكز البحوث (DLR) في ألمانيا، واللجنة الوطنية الاسترالية جامعة (ANU) في أستراليا، ومعهد طوكيو للتكنولوجيا (CEA) و (PROMES) في فرنسا [14].

❖ **حوصلة:** بسبب انخفاض درجة النضج التكنولوجي و هي أكثر ملاءمة لتخزين ما بين المواسم، التخزين حراروكيميائي لا يتم الاعتماد عليه حاليا كحل لاسترداد الحرارة المفقودة من الصناعة الداخلية.

4.IV. ملخص للميزات الايجابية لكل نظام والتطبيقات الأكثر مناسبة لاستخدامها

نظام التخزين	التخزين الحراري الحساس	التخزين الحراري الكامن	التخزين الحراري الحراروكيميائي
مزايا كل نظام	<ul style="list-style-type: none"> - تقنيات بسيطة - مواد تخزين متوفرة - كثافة طاقة معتبرة لبعض مواد التخزين - اتساع نطاق درجة حرارة التخزين - استخدامات واسعة 	<ul style="list-style-type: none"> - كثافة تخزين أكبر - استنفاد حجم تخزين أقل - استردا الطاقة في درجة حرارة ثابتة - ويمكن التخزين في درجات حرارة منخفضة - الحاجة إلى عزل أقل 	<ul style="list-style-type: none"> - كثافة طاقة عالية جدا - التخزين في درجة حرارة الغرفة - لا تحتاج إلى عزل - مدة تخزين أطول - مسافة نقل أكبر
أنسب التطبيقات لكل نظام	<ul style="list-style-type: none"> - تطبيقات الطاقة الشمسية - كتسخين الماء - وتدفئة المباني 	<ul style="list-style-type: none"> - تكييف المباني - تبريد الآلات الالكترونية 	<ul style="list-style-type: none"> - التخزين الموسمي

الجدول IV. 10. جدول يلخص مقارنة بين ايجابيات أنظمة التخزين الحراري وتطبيقاتها المناسبة

الختامة

الخاتمة :

في هذا العمل قمنا بدراسة مقارنة بين أنظمة التخزين الحراري (المحسوس - الكامن - الحراروكيميائي) أردنا من خلالها أن نلم بميزات وعيوب كل نظام لتسهيل عملية اختيار النظام المناسب للتخزين المعطى . حيث اعتمدنا على عدة معايير مختلفة للمقارنة بين هذه الأنظمة بعد دراسة مفصلة لكل نظام وتصميمه ، فوجد أن هناك تفاوت كبير في استعمالات الأنظمة الثلاث فمنها ما اخذ حظ كبير من الشهرة والتطور والاستخدام ومنها مالا يزال استعماله ضئيل جدا وقد يكون محصور في المجال المخبري فقط، بالرغم من أن كل نظام له أفضلية في الاستعمال لتخزين معين على الأنظمة الباقية. فمثلا نظام التخزين الحراري المحسوس لأنه بسيط وسهل الاستعمال نجد تطبيقاته بكثرة في مجال الطاقة الشمسية . حيث تخزن الحرارة المحسوسة لتستعمل في العديد من التطبيقات أهمها تسخين الماء ومجال المباني، إلا أن استخدام نظام التخزين الكامن في المباني والمنشآت له الأفضلية على التخزين السابق وهذا لكثافته العالية واحتياجه إلى عزل اقل مقارنة معه . فتستخدم مواد تغيير الطور MCP لزيادة الكم الحراري المخزون، حيث تطلّى مواد البناء كالكونكريت او الجبس بمادة البارافين مثلا ذات درجة الانصهار المقارب لـ 25 C° ، ما أن تتجاوز درجة الحرارة الداخلية هذه الدرجة تنصهر المواد الشمعية فتسحب الحرارة الزائدة لكي تطرح إلى الفضاء ليلا. بهذا الحل يمكن استخدام مواد إنشاء أقل سمكاً وبأقل مواد عازلة لتأمين الحرارة المطلوبة داخل الفضاء الداخلي. كما يمكن مواد تغيير الطور أن تستخدم في مكافحة الزيادة الحرارية في المحولات الكهربائية أو رقائق الكمبيوتر حيث تحول الطاقة الحرارية إلى مخزون يستخدم لاحقا في الأوقات الباردة.

غير أن مشكلة العزل الحراري لكلا النظامين السابقين تنقص من فعاليتيهما بالمقارنة مع التخزين الحراروكيميائي، خاصة في مجال التخزين الموسمي فهذا الأخير لا يحتاج إلى عزل وهذا يجعله يدوم لمدة أطول ويقلل من تكاليف التخزين ، ليس هذه الميزة فقط فكثافة التخزين العالية كذلك تؤهله لان يلقى اهتماما كبيرا من طرف خبراء الطاقة والتخزين . وهذا من بين الأهداف التي نطمح إليها من خلال عملنا هذا في أن نبين مدى أهمية التخزين الحراري الحساس وهذا ما لاحظناه من خلال استخداماته الواسعة وبساطته من اجل زيادة تطويره ، ونسلط الضوء على نظامي التخزين الحراري الكامن والحراروكيميائي نظرا لعدم انتشارهما على النطاق الواسع بالمقارنة مع المحسوس ، ونرتقي مستقبلا بان تزيد عدد المشاريع الخاصة بالتخزين الكامن وتطويرها خاصة في مجال تكييف المباني فهو ملائم جدا والطموح الأكبر أن تنفذ مثل هذه المشاريع في منطقتنا ولما لا. كذلك التخزين

الحراروكيميائي الذي لا تزال معظم بحوثه نظرية وتطبيقاته معظمها على المستوى المخبري تقريبا ، بالرغم من أن استغلال الطاقة العالية جدا المخزنة في المركبات الكيميائية تعتبر قفزة نوعية في مجال الطاقة .

المراجع

قائمة المراجع

- [1] I. Dincer and M. Rosen, "Thermal energy storage: systems and applications," 2nd ed. John Wiley & Sons, 2011, pp. 84-141.
- [2] <https://zoom-teach.blogspot.com> › الديناميكا الحرارية.
- [3] www.uobabylon.edu.iq/eprints/paper_5_6482_358.
- [4] Y. Demirel, "Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling," Springer-Verlag London Limited, 2012, pp. 27-324.
- [5] LOTTNER, V., SCHULZ, M. E. & HAHNE, E. (2000) Solar-Assisted District Heating Plants: Status of the German Programme Solarthermie-2000. Solar Energy, 69, 449-459.
- [6] J. Bougard and H. druenne and R. jadot, " Stockage de l'energie solaire dans des reactions chimiques reversibles: etude d'une pompe a chaleur chimique a ammoniacates,". CECA — CEE — CEEA, Bruxelles-Luxembourg, 1985, pp. 1-3.
- [7] KATO, Y., HARADA, N. & YOSHIZAWA, Y. (1999) Kinetic feasibility of a chemical heat pump for heat utilization of high-temperature processes. Applied Thermal Engineering, 19, 239-254.
- [8] Amina Akrouche, " Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase," , Mémoire Pour l'obtention du diplôme de Magister, 2011.
- [9] Mahfoudi Nadjiba, " Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide," , Thèse Pour l'obtention du diplôme de Doctorat, 2016.
- [10] Ali Abou Hassan, " Modélisation et caractérisation de modules de stockage de chaleur comprenant des matériaux à changement de phase," , Rapport de stage Master Recherche, 2012.
- [11] Ghedamsi Rébha, " Elaboration d'un matériau de construction en vue de l'isolation thermique des bâtiments," , Mémoire Pour l'obtention du diplôme de Magister, 2013.
- [12] Maha AHMAD, "Couplage matériaux à changement de phase, supe isolation, apports solaire,".
- [13] Adèle Soupert-Caron, " Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase," , Thèse Pour obtenir le grade de Docteur, 2015.
- [14] Stéphanie Hongois, " Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle," , Thèse Pour obtenir le grade de Docteur, 2011.
- [15] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, "Energy storage systems-characteristics and comparison," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, pp. 29-160, 2008.

- [16] NREL, "Survey of thermal storage for parabolic trough power plants," NREL/SR-550-27925, 2000.
- [17] N. Siegel, M. Gross, C. Ho, T. Phan, and J. Yuan, "Physical Properties of Solid Particle Thermal Energy Storage Media for Concentrating Solar Power Applications," *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 1015-1023, 2014.
- [18] M. Hadjieva, R. Stoykov, and T. Filipova, "Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage," *Renewable Energy*, vol. 19, pp. 111-115, 2000.
- [19] S. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques," *Energy Conversion and Management*, vol. 39, pp. 1127-1138, 1998.
- [20] Bourgueba Djaoued et Bekkouche Ismail, "Simulation numérique du stockage de l'énergie solaire par chaleur latente," *Mémoire Pour l'obtention du diplôme de Master*, 2014.
- [21] Pierre Pardo, "Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par thermochimique," *Thèse Pour obtenir le grade de Docteur*, 2013.
- [22] SCHMIDT, T., MANGOLD, D. and MÜLLER-STEINHAGEN, H. (2004) Central solar heating plants with seasonal storage in Germany. *Solar Energy*, 76, 165-174.
- [23] Cabeza, Luisa F., Castellón, Cecilia, Nogués, Miquel, Medrano, Marc, Leppers, Ron, & Zubillaga, Oihana. 2007. Use of microencapsulated pcm in concrete walls for energy savings. *Energy and buildings*, 39(2), 113 – 119.
- [24] Castell, A., Martorell, I., Medrano, M., Pérez, G., & Cabeza, L.F. 2010. Experimental study of using pcm in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and buildings*, 42(4), 534 – 540.
- [25] CABEZA, L. F., IBÁÑEZ, M., SOLÉ, C., ROCA, J. & NOGUÉS, M. (2006) Experimentation with a water tank including a PCM module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 1273-1282.
- [26] HADORN, J.-C. (2005) Thermal energy storage for solar and low energy buildings, state of art by the IEA Solar Heating and Cooling Programme Task 32.
- [27] www.reemoshare.com/dfile/www.alkottob.com-Energy.
- [28] Stéphane Guichard, "Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changements de Phase: Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale," *pour obtenir le grade de Docteur*, 2013.

ملخص بالعربية :

إن العمل المقدم في هذا البحث الهدف منه دراسة مقارنة بين أنظمة التخزين الحرارية لتسهيل اختيار النظام المناسب للتخزين المعطى سواء كان لأجل التسخين أو التبريد .

ولإنجاز هذا العمل إعتبرنا مجموعة من المعايير : كثافة التخزين الحراري ، مدة التخزين ، خصائص مواد التخزين (الفيزيائية ، الكيميائية ، والحرارية ...) الجانب التكنولوجي والاقتصادي ،مسافة نقل الطاقة . حيث اتبعت الخطوات التالية : تقديم مجموعة من المعطيات لكل نظام ؛تحليل ومناقشة المعطيات ؛ حوصلت نتائج (سلبيات وإيجابيات كل نظام) و اختيار النظام الأنسب للتطبيقات المقترحة على أساس النتائج المحصل عليها .

Résumé en français

Le travail fourni dans cette recherche a pour but une étude comparative des systèmes de stockage d'énergie afin de choisir celui le plus convenable au stockage visé soit en vue d'échauffement ou de refroidissement.

Pour réaliser cette étude on a choisi plusieurs critères :densité d'énergie stockée, durée de stockage, caractéristiques des matériaux de stockage (physique, chimique et thermique...), le coté technologique et économique et la distance de transfert d'énergie. Cela exige les étapes suivantes: présenter les données de chaque système; analyser et discuter ces données ; récapituler les résultats (inconvenients et avantages de chaque système) et enfin choisir le système le plus approprié aux applications proposées selon les résultats obtenus.

Abstract in English

The work provided in this research is a comparative study of energy storage systems to choose the one most suitable for the storage targeted either for heating or cooling.

In order to carry out this study, several criteria were chosen: stored energy density, storage time, characteristics of storage materials (physical, chemical and thermal), technological and economic aspects and energy transfer distance. This requires the following steps: present the data of each system; Analyze and discuss these data; Summarize the results (disadvantages and advantages of each system) And finally choose the most suitable system for the proposed applications according to the results obtained..